

---

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

**Tester pro analýzu signálu z průtokoměrného  
čidla**

**Tester for the flow sensor signal analysis**

**Diplomová práce**

Autor:	<b>Bc. Pavel Hynek</b>
Vedoucí práce:	Ing. Lubomír Slavík Ph.D.

**V Liberci 17. 5. 2012**



## Zadání diplomové práce

Jména a příjmení studentů (osobní číslo)	Bc. Pavel HYNEK (M11000271)
Zkratka pracoviště	RSS
Datum zadání BP	15. října 2012
Plánované datum odevzdání	17. května 2013
Rozsah grafických prací	Dle potřeby dokumentace
Rozsah průvodní zprávy	cca 40 stran
Název RP (česky)	<b>Tester pro analýzu signálu z průtokoměrného čidla</b>
Název RP (anglicky)	<b>Tester for the flow sensor signal analysis</b>
<p><b>Zásady pro vypracování diplomové práce:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prostudujte princip funkce a zpracování signálu z elektromagnetického čidla průtoku, problematiku vysoce přesných AČ převodníků a mikroprocesorů ARM Cortex.</li> <li>2. Navrhněte základní hardware a software testeru pro analýzu signálu z čidla.</li> <li>3. Realizujte funkční desku plošných spojů a ověřte základní funkce testeru.</li> </ol>	
<p><b>Seznam odborné literatury:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ďaďo, S., Bejček, L., Platil, A.: Měření průtoku a výšky hladiny. Praha, BEN 2005</li> <li>2. Kester W. + kol.: Practical Analog Design Techniques, Analog Devices, 1995</li> <li>3. Úvod do architektury Coretex-M, <a href="http://www.pandatron.cz">http://www.pandatron.cz</a></li> <li>4. Katalogové listy součástek firem Analog Devices, Texas Instruments, ST</li> </ol>	
<b>Vedoucí projektu</b>	Ing. Lubomír Slavík, Ph.D., RSS

# Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## Poděkování

Rád bych poděkoval rodičům za podporu nejen při vytváření této práce, psaní tohoto dokumentu, ale i v životě.

Dále děkuji vedoucímu práce, Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph.D., za cenné rady při realizaci této práce.

Zároveň děkuji za technickou podporu a pomoc při řešení problémů v průběhu práce bc. Marvinu Gjepalimu a bc. Matějovi Kolářovi.

# Anotace

Práce je zaměřena na návrh a realizaci přípravku pro ověření citlivosti čidel elektromagnetických průtokoměrů za využití mikroprocesoru s jádrem typu Cortex-M. Vstupní obvod je určen pro snímání nízkoúrovňového diferenciálního signálu průtokoměrného čidla s dostatečným zesílením a jeho zpracování pomocí 16bitového analogově-číslicového převodníku s dostatečnou vzorkovací frekvencí. Budicí obvod má za úkol napájet cívky střídavým obdélníkovým průběhem s konstantní absolutní hodnotou proudu. Zároveň musí být dostatečně robustní pro spínání vyšších indukčností. Řídící část zajišťuje koordinaci jednotlivých elektronických bloků, výpočty, autodiagnostiku a základní interakci s uživatelem.

Důraz je kladen i na nízkou spotřebu, proto je pro napájení analogové i digitální části zvoleno jednotné napětí stabilizované pomocí spínaného zdroje.

Výběr vhodných integrovaných obvodů je popsán v teoretické části i s uvažovanými alternativami. Na základě rozboru problematiky byl navržen a realizován elektronický obvod schopný vyhodnocovat signál z průtokoměrného čidla.

## Klíčová slova

Indukční průtokoměr, Zdroj konstantního proudu, H-můstek, Cortex-M4F, Analogově digitální převodník

# Annotation

The work focuses on the design and realization of measurement on the inductive flow sensor for use microprocessor core Cortex-M. The proposed circuit is designed to work independently without additional electronics. The input circuit is designed for low-voltage differential voltage sensing with sufficient gain and sampling frequency. Excitation circuit is designed to power the coil square wave with a constant absolute value of the current. It also needs to be adequately robust for switching of higher inductance. Computing part provides the necessary management, calculations and basic interaction with the user, including basic detection of errors and diagnostics. Restricting single power supply circuit is targeted for versatility and high efficiency. The selection of suitable integrated circuits is described in the theoretical part is the considered alternatives. Based on the analysis of the problems has been designed and implemented an electronic circuit able to measure in several configurations to verify the correct approach to the problems of development.

# Keyword

Inductive flow meters, Constant current source, Full-bridge, Cortex-F4M, Analog-digital converter

# Obsah

PROHLÁŠENÍ .....	3
PODĚKOVÁNÍ .....	4
ANOTACE .....	5
KLÍČOVÁ SLOVA .....	5
ANNOTATION.....	6
KEYWORD .....	6
OBSAH .....	7
ÚVOD.....	12
<b>1. TEORETICKÝ ROZBOR.....</b>	<b>13</b>
1.1.    INDUKČNÍ ČIDLO .....	13
1.2.    MIKROPROCEROR .....	14
1.3.    VSTUPNÍ ZESILOVAČ .....	19
1.4.    BUDICÍ OBVOD .....	20
<b>2. NÁVRH A REALIZACE.....</b>	<b>24</b>
2.1.    ZÁKLADNÍ NÁVRH .....	24
2.2.    VSTUPNÍ ANALOGOVÝ OBVOD .....	25
2.3.    ANALOGOVĚ DIGITÁLNÍ PŘEVODNÍKY .....	26
2.3.1. <i>Převod vstupního signálu.....</i>	<i>26</i>
2.3.2. <i>Měření budicího proudu.....</i>	<i>27</i>
2.3.3. <i>Doplňková měření (auto-diagnostika) .....</i>	<i>27</i>
2.4.    BUDICÍ OBVOD .....	28
2.5.    NAPÁJECÍ OBVODY PRŮTOKOMĚRU .....	31
2.5.1. <i>Napájecí obvod digitálního a analogového obvodu .....</i>	<i>31</i>
2.5.2. <i>Napájecí obvod H-můstku.....</i>	<i>34</i>
2.5.3. <i>Výkonové ztráty napájení H-můstku .....</i>	<i>38</i>
2.6.    PAMĚTI .....	40
2.7.    UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ.....	42
2.8.    ŘÍDÍCÍ MIKROPROCEROR .....	44
2.9.    NÁVRH A ROZLOŽENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	46
<b>3. SOFTWARE.....</b>	<b>49</b>



3.1.	ŘÍZENÍ BUZENÍ.....	49
3.2.	MĚŘENÍ NAPĚTÍ POMOCÍ MIKROPROCESORU .....	51
3.3.	MĚŘENÍ VSTUPNÍHO SIGNÁLU (AD7683) .....	53
3.4.	ALGORITMUS MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT .....	54
3.5.	POČÍTAČOVÝ PROGRAM .....	58
<b>4.</b>	<b>MĚŘENÍ NA PŘÍPRAVKU.....</b>	<b>59</b>
<b>5.</b>	<b>SHRNUTÍ .....</b>	<b>61</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>64</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>67</b>

# Seznam obrázků

OBR. Č. 1 - PRŮTOKOVÉ INDUKČNÍ ČIDLO (VYTVOŘENO POMOCÍ PROGRAMU BLENDER).....	14
OBR. Č. 2 - LPCXPRESSO LPC1769 .....	15
OBR. Č. 3 - KIT SAM4S XPLAINED .....	16
OBR. Č. 4 - STM32F3 DISCOVERY KIT.....	17
OBR. Č. 5 - STM32F4 DISCOVERY KIT.....	18
OBR. Č. 6 - BUZENÍ POMOCÍ ZESILOVAČE TYPU D (VSTUP 5V, 16Hz) .....	21
OBR. Č. 7 - BUZENÍ POMOCÍ ZESILOVAČE TYPU D (VSTUP 3V, 6Hz) .....	22
OBR. Č. 8 - BUZENÍ POMOCÍ ZESILOVAČE TYPU D (VSTUP 3V, 24Hz) .....	23
OBR. Č. 9 - DIAGRAM ROZLOŽENÍ NÁVRHU .....	24
OBR. Č. 10 - VSTUPNÍ ANALOGOVÝ OBVOD.....	25
OBR. Č. 11 - H-MŮSTEK.....	29
OBR. Č. 12 - DOPORUČENÉ ZAPOJENÍ IR2104[12].....	30
OBR. Č. 13 - PŘEPÍNÁNÍ H-MŮSTKU .....	31
OBR. Č. 14 - NAPÁJECÍ OBVOD DIGITÁLNÍHO A ANALOGOVÉHO OBVODU + REFERENČNÍ NAPĚTÍ [13].....	33
OBR. Č. 15 - NAPÁJENÍ H-MŮSTKU .....	35
OBR. Č. 16 - VA CHARAKTERISTIKA OBVODU FDS89141[15].....	37
OBR. Č. 17 - STABILIZÁTOR NAPĚTÍ LM317.....	37
OBR. Č. 18 - PAMĚTI.....	41
OBR. Č. 19 - OVLÁDACÍ ROZHRANÍ .....	43
OBR. Č. 20 - PŘIPOJENÍ MIKROPROCESORU STM32F407VG (VYTVOŘENO POMOCÍ PROGRAMU MICROXPLOER) .....	46
OBR. Č. 21 - ROZLOŽENÍ DPS .....	48
OBR. Č. 22 - TIMER BUZENÍ .....	50
OBR. Č. 23 - ADC MIKROPROCESORU: SCAN MODE+DMA.....	52
OBR. Č. 24 - PŘÍJEM DAT Z AD7683 (SNÍMÁNO POMOCÍ PROGRAMU USBEE SUITE).....	54
OBR. Č. 25 - ALGORITMUS SPOUŠTĚNÍ MĚŘENÍ.....	55
OBR. Č. 26 - ALGORITMUS MĚŘENÍ .....	57
OBR. Č. 27 – GRAF: MĚŘENÍ BUDÍČÍHO PROUDU .....	60
OBR. Č. 28 – GRAF: MĚŘENÍ NAPRAZDNO S RŮZNÝM ZESÍLENÍM .....	60

# Seznam tabulek

TAB. Č. 1 - PARAMETRY MIKROPROCESORŮ [3][4][5][6] .....	18
TAB. Č. 2 - SROVNÁNÍ PŘÍSTROJOVÝCH ZESILOVAČŮ[7][8][9].....	20
TAB. Č. 3 - KONFIGURACE ZDROJE BUZENÍ.....	34
TAB. Č. 4 - ÚČINNOSTI NAPÁJENÍ H-MŮSTKU .....	40
TAB. Č. 5 - LED SIGNALIZACE (VERZE SYSTÉMU KE DNI 2.2.2013).....	43
TAB. Č. 6 - SOFTWARE: TABULKA FUNKCÍ BUZENÍ .....	49
TAB. Č. 7 - VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ NAPRÁZDNO .....	60

## Seznam symbolů, zkratek a termínů

Symbol/ Zkratka	Vyjádření zkratky	Vysvětlení
DPS	Deska plošných spojů	Deska pro výrobu obvodů
GND	Ground	Elektronická zem
float		Datový formát s plavoucí desetinou čárkou
SMD	Surface Mounted Devices	Typ pouzder součástek pro povrchovou montáž
USART		
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sériová sběrnice
DAC	Digital-Analog convertor	Digitálně-analogový převodník
ADC	Analog-Digital convertor	Analogově-digitální převodník
I2C		Adresovaná sběrnice
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory	Elektricky mazatelná paměť
Pull-Down		Rezistor mezi signálem a elektrickou zemí
SWD	Serial Wire Debug	Rozhraní pro naprogramování mikroprocesorů
DMA	Dynamic Memory Access	Jednotka pro nezávislý přesun dat

# Úvod

Práce je vytvářena je zaměřena na návrh a realizaci testeru indukčního průtokového čidla s využitím moderních mikročipů s jádrem typu Cortex-M. Cílem práce je vytvořit nezávislý obvod schopný zpracovat nízkonapěťový diferenciální analogový signál s dostatečnou vzorkovací frekvencí a přesností. Zařízení musí zajistit konstantní proudové buzení indukční zátěže. Výstupní střídavý obdélníkový proud buzení musí být při přepínání dostatečně strmý a nesmí obsahovat velké překmity. Zároveň musí být dostatečně robustní na přepěťové špičky vznikající přepínáním polarity buzení. Řídící část zajišťuje ovládání bloku budícího proudu a zpracovává signál ze vstupního zesilovače, včetně výpočtů pro převedení vstupního signálu na rychlost proudění měřené kapaliny. Současně má za úkol zajišťovat základní interakci s uživatelem a umožnit nastavení hodnot důležitých pro měření a jejich uložení do paměti. Naměřené hodnoty po omezenou dobu bude uchovávat pro další použití. Napájecí obvod má za úkol napájet jednotlivé části zařízení, bez zanášení rušení do ostatních částí. Pro napájení analogových obvodů musí být napájení dostatečně přesné, především pak referenční napětí. Zdroj buzení musí mít naopak dostatečný výkon pro přechodové stavy. Návrh řídicího softwaru musí zajistit správné časování jednotlivých prvků obvodu, jejich inicializaci a optimální nastavení parametrů a z naměřených dat vypočítat průtok kapaliny. Problematika výběru vhodných integrovaných obvodů je popsána v teoretické části i s uvažovanými alternativami. Po zvolení vhodných integrovaných obvodů je v další části navrhnut a realizován elektronický obvod se softwarem pro ověření základních vlastností obvodu.

# 1. Teoretický rozbor

## 1.1. Indukční čidlo

Čidla indukčního typu využívají Faradayův indukční zákon. Ten nám říká, jestliže pohybujeme vodičem (uzavřený elektrický obvod) v magnetickém poli, indukuje se ve vodiči proud. Výsledné napětí na vodiči je dáno rychlostí vodiče. Uvažujeme-li pohyblivý vodič (směr vektoru rychlosti je kolmý k vodiči a k magnetickému poli) v homogenním magnetickém poli kolmém na vodič, působí na elektricky nabitě částice Lorentzova síla

$$F = q \cdot v \times B. \quad (\text{Eq. 1})$$

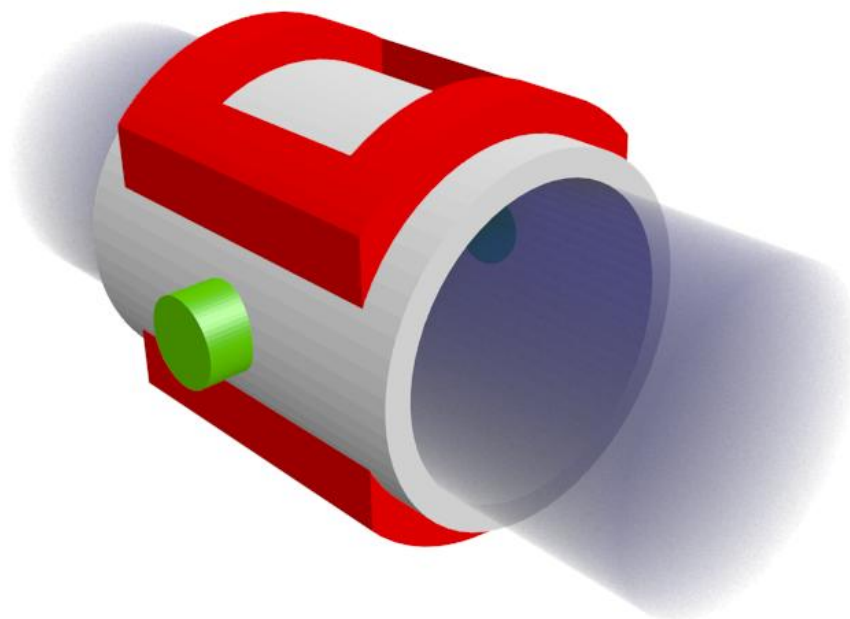
Tato síla způsobí, že na koncích vodiče se hromadí elektricky nabitě částice. Přesun nábojů vytvoří na koncích tyče potenciály ( $V_A$  a  $V_B$ ), které vytvoří napětí

$$V_{AB} = V_A - V_B = B \cdot l \cdot v. \quad (\text{Eq. 2})$$

Faradayova indukčního zákona se dá využít pro měření průtoku kapalin za několika předpokladů. Vodič nám v tomto případě nahradí protékající kapalina a čidlo změří rychlost průtoku. Hlavním kritériem je požadavek vodivé kapaliny. Může obsahovat pevné příměsi, které ovšem musí být taktéž vodivé. Vzduch ve formě vzduchových bublin vytváří chyby. [1]

Výhody indukčního snímače je schopnost měřit průtok znečištěných kapalin, nemají pohyblivé části (bezúdržbové), nezpůsobují ztráty rychlosti a tlaku kapaliny. Nevýhodami je především nutnost elektrického napájení, složitější elektroniku a buzení způsobuje rušení.

Na obrázku (Obr. č. 1) je znázorněno indukční čidlo. Světle šedou barvou je znázorněno potrubí, které nesmí být vodivé a stínit buzení. Červená barva znázorňuje cívky buzení. Zelenou barvou jsou znázorněny měřící elektrody a modrou barvou je znázorněna kapalina.



*Obr. č. 1 - Průtokové indukční čidlo (vytvořeno pomocí programu Blender)*

## ***1.2. Mikroprocesor***

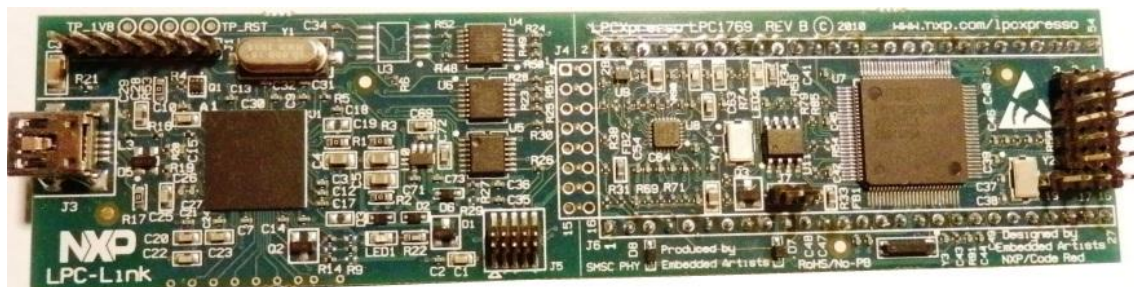
Srdcem přípravku je mikroprocesor, který řídí celý proces měření včetně případného výpočtu pro zpracování signálu. Řídí nejen samotné buzení cívek, ale i nastavuje vstupní obvody. To od mikroprocesoru vyžaduje vybavenost komunikačních periférií a vysoký výpočetní výkon.

Zvolená architektura je typu ARM Cortex-M, která je odvozena od ARM7. Je určena především do průmyslových aplikací a na rozdíl od Cortex-R je levnější, ale nedisponuje takovým výkonem, který je zapotřebí v real-time aplikacích. Parametry všech posuzovaných mikroprocesorů jsou v tabulce na konci odstavce (Tab. č. 1). [2]

Pro výběr vhodného mikroprocesoru byly stanoveny kritéria nejen na samotný procesor (výkon, periferie a paměť), ale i na vývojové prostředí (uživatelská přívětivost, dostupnost a rozšíření).

Prvním zvažovaným mikroprocesorem je LPC1769 od firmy NXP. Mikroprocesor byl posuzován na přípravku LPCXpresso (Obr. č. 2). Tento vývojový kit je rozdělen na programátor s debuggrem a samotnou část procesoru. Rozložení umožňuje

rozdělení desky na dvě a programátorovou část použít nezávisle na programování jiných procesorů podporující JTAG LPC-link. Deska neobsahuje pro naše aplikace žádný port (USB, RS-232, ...) a pouze vyvádí jednotlivé piny ke stranám kitu.



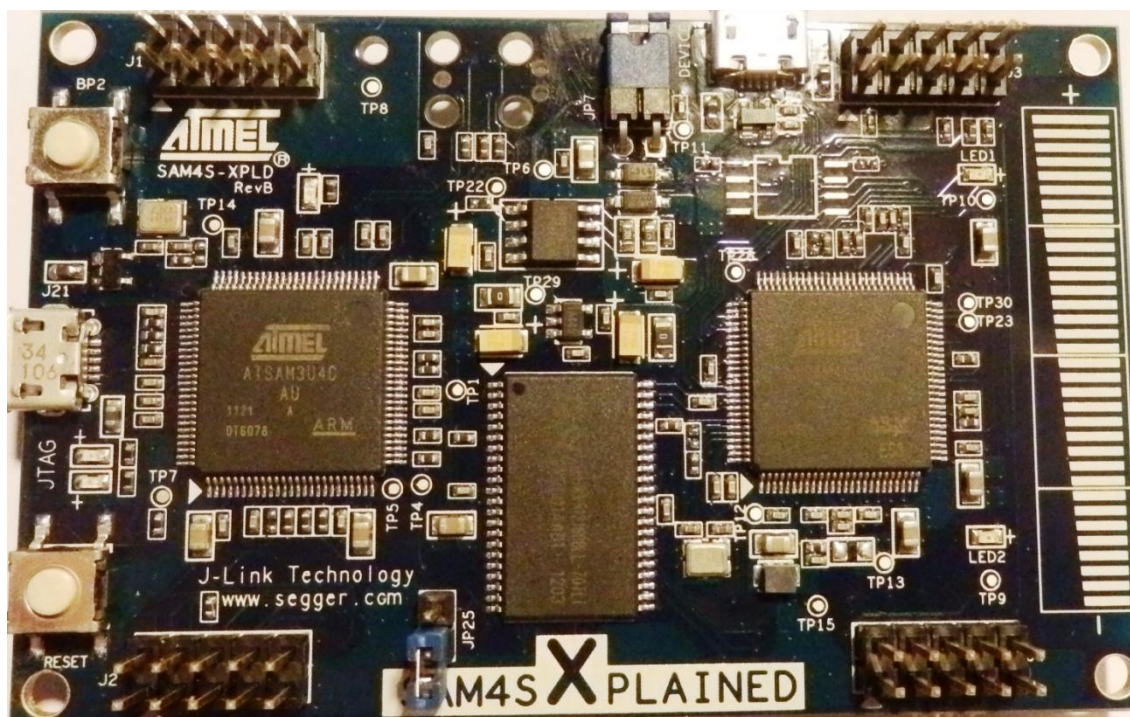
*Obr. č. 2 - LPCXpresso LPC1769*

Vývojové prostředí k tomuto kitu NXP nabízí z názvem LPCXpresso od firmy Code Red. Vývojové prostředí je nabízeno zdarma a po zaregistrování je limit na překládaný kód 128kb. Prostedí je usazeno do populárního vývojového rozhraní Eclipse.

Druhým procesorem je SAM4S16C od firmy Atmel. Jedná se o mikroprocesor s jádrem Cortex-M4 a instrukční sadou pro podporu zpracování signálů. Vyniká především nízkou spotřebou a taktem 120 MHz. Procesor je hodnocen dle vývojového kitu SAM4S Xplained (Obr. č. 3). Kit obsahuje flash paměť, 4 QTouch tlačítka (tlačítko bez pohyblivých částí pracující na principu kapacitního snímače přiblížení) a USB pro uživatelské aplikace.

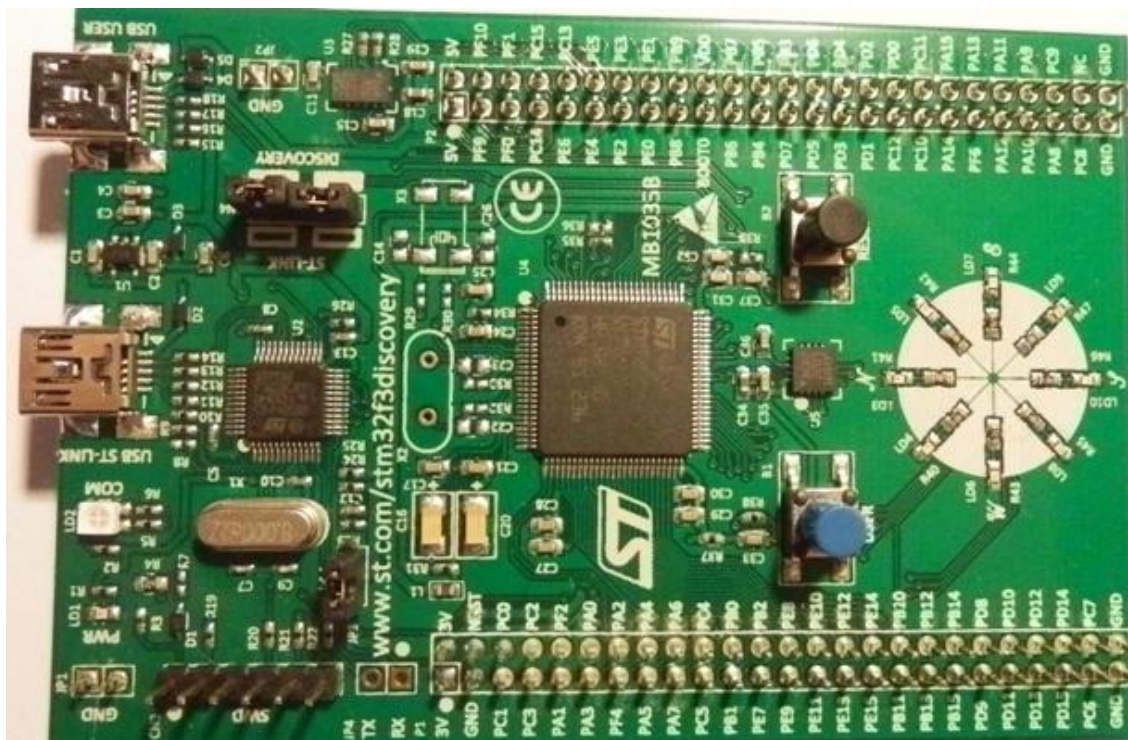
Vývojové prostředí je přímo od firmy Atmel a jmenuje se Atmel Studio 6.0. Jeho největší výhodou je, že je zdarma a bez omezení. Výrobce navíc implementoval pro vývojáře podporu s názvem Framework, která nabídne ke stažení knihovny (např. na LCD).





Obr. č. 3 - Kit SAM4S XPlained

Poslední dvojice posuzovaných procesorů od firmy STMicroelectronics má shodné jádro Cortex-M4F, které oproti předchozímu procesoru s Cortex-M4 obsahuje jednotku pro výpočet s desetinou čárkou a proto se hodí více pro zpracování analogových signálů. Procesory nové řady STM32F3 jsou přímo určeny pro práci s analogovými obvody. Sám již obsahuje některé analogové obvody, které jsou integrovány přímo v procesoru. Běžně se analogové obvody v mikroprocesorech neobjevují (operační zesilovače, 16b ADC,...). Obsažené analogové obvody ovšem nedosahují potřebných přesností a chybu nejvíce způsobuje nelinearita obvodů. Tudíž se pro přesné analogové obvody nehodí a musely by být použity externí součástky. Vývojový přípravek s označením STM32F3 Discovery (Obr. č. 4) obsahuje procesor STM32F303. Kit zahrnuje magnetometr, který ve spojení s LED diodami uspořádanými do kruhu je zamýšlen jako elektronický kompas. Uživatelské aplikace připojíme například k PC pomocí druhého USB, připojeného k procesoru. Přípravek obsahuje programátor ST-Link, obsahující debugger s možností programovat nejen osazený mikroprocesor, ale pomocí rozhraní SWD i jiná zařízení.



Obr. č. 4 - STM32F3 Discovery kit

Poslední mikroprocesor je STM32F407 (Obr. č. 5). Obsahuje stejné jádro jako předchozí procesor, ale liší se v taktu jádra, které může dle výrobce dosahovat frekvence 168MHz. Navíc disponuje flash pamětí o velikosti 1MByte a 82 GPIO piny. Kit obsahuje programátor SWD. Pro aplikace je osazen USB, MEMS akcelerometr, digitální mikrofon a audio obvod pro vstup/výstup audio signálu.

Výrobce procesorů STM32F303 a STM32F407 nedodává k mikroprocesorům vlastní vývojové prostředí. Místo toho doporučuje několik prostředí jiných firem. Vybrané prostředí Atollic TrueSTUDIO for ARM Lite. Jedná se o omezenou verzi komerčního produktu s limitem na velikost překládaného kódu. Pro různé typy procesorů se liší i omezení. Jedná se o poměrně rozšířené rozhraní (především Lite verze) běžící na rozhraní Eclipse.





Obr. č. 5 - STM32F4 Discovery kit

Tab. č. 1 - Parametry mikroprocesorů [3][4][5][6]

	LPC 1769	SAM4S16C	STM32F303	STM32F407
Jádro	Cortex-M3	Cortex-M4	Cortex-M4F	Cortex-M4F
Frekvence [MHz]	120	120	72	168
Paměť flash [kB]	512	1024	256	1024
Výkon [MIPS/MHz]			1,25	1,25
FPU	Ne	Ne	Ano	Ano
SRAM [kB]	64	128	40	196
GPIO [-]	70	79	45	82
SPI [-]	3	3	3	3
max. rychlost SPI [Mb/s]	12,5   SPP=50MHz		18	37,5
USB	Ano	Ano	Ano	Ano
Ethernet	Ano	Ne	Ne	Ano
Cena [Kč]	258	284	261	346

### ***1.3. Vstupní zesilovač***

Výstupní signál z indukčního průtokového čidla je předpokládán nízkonapěťový diferenciální signál s maximální amplitudou 2mV. Jelikož většina analogově-digitálních převodníků (dále jen převodník) má rozsah od 1,8 – 3,3 V je potřeba vstupní signál zesílit pro využití celého rozsahu převodníku. Od zesilovacího členu je požadována co největší přesnost zesílení, malé zkreslení, diferenciální vstup a schopnost práce bez symetrického napětí. Těmto požadavkům nejlépe vyhovují přístrojové zesilovače.

Prvním přístrojovým zesilovačem je INA331 od firmy Texas Instrument. Jedná se o přístrojový zesilovač s minimálním zesílením 5 V/V. Nastavení zesílení je pomocí externích rezistorů. Má nízkou teplotní nelinearitu 2 ppm/°C a napěťový offset je 250  $\mu$ V. Vnitřní zapojení obvodu je přiloženo v příloze (Příloha A). Hlavní výhodou obvodu je jednoduchost a cena. Nevýhodou je pevné zesílení, které nelze nastavit jinak než fyzickou výměnou rezistorů. Do výsledné chyby zesílení se musí zahrnout i nepřesnosti externích rezistorů. [7]

Druhým přístrojovým zesilovačem je AD8231-EP[8] (Příloha B) od firmy Analog Devices. Zesílení obvodu se mění pomocí 3 bitového paralelního interfacu. Zesílení se nastavuje v osmi krocích v rozmezí 1 V/V až 128 V/V. Vlastnost měnit zesílení v průběhu měření, by umožnila využít měřicí rozsah převodníku i při malých signálech. Naopak při silnějších signálech by nedocházelo dosažení saturace měřicího rozsahu. Výhodou převodníku je, že nepotřebuje k nastavení zesílení externí obvody, které by do měření zanášely chybu. Navíc pouzdro obsahuje operační zesilovač, který je možné použít nezávisle na přístrojovém zesilovači.[8]

Třetím uvažovaným zesilovačem je LMP8358[9] (Příloha C) od firmy Texas Instrument. Zesílení se nastavuje pomocí sériového nebo paralelního portu (lze nastavit). Zesílení lze nastavit v sedmi krocích od 10 V/V do 1000 V/V a zároveň lze osmou možností využít uživatelské zesílení, které je dáno externím obvodem. To umožňuje přesné zesílení pomocí vnitřních obvodů a v případě nevyhovujících kroků zesílení, lze velikost zesílení určit dle volby vývojáře. Další výhodou je možnost

nastavení vstupů (Příloha D), které umožní měřit nejen diferenciální signál, ale jednotlivé hodnoty vstupního signálu a referenční napětí operačního zesilovače.[9]

*Tab. č. 2 - Srovnání přístrojových zesilovačů[7][8][9]*

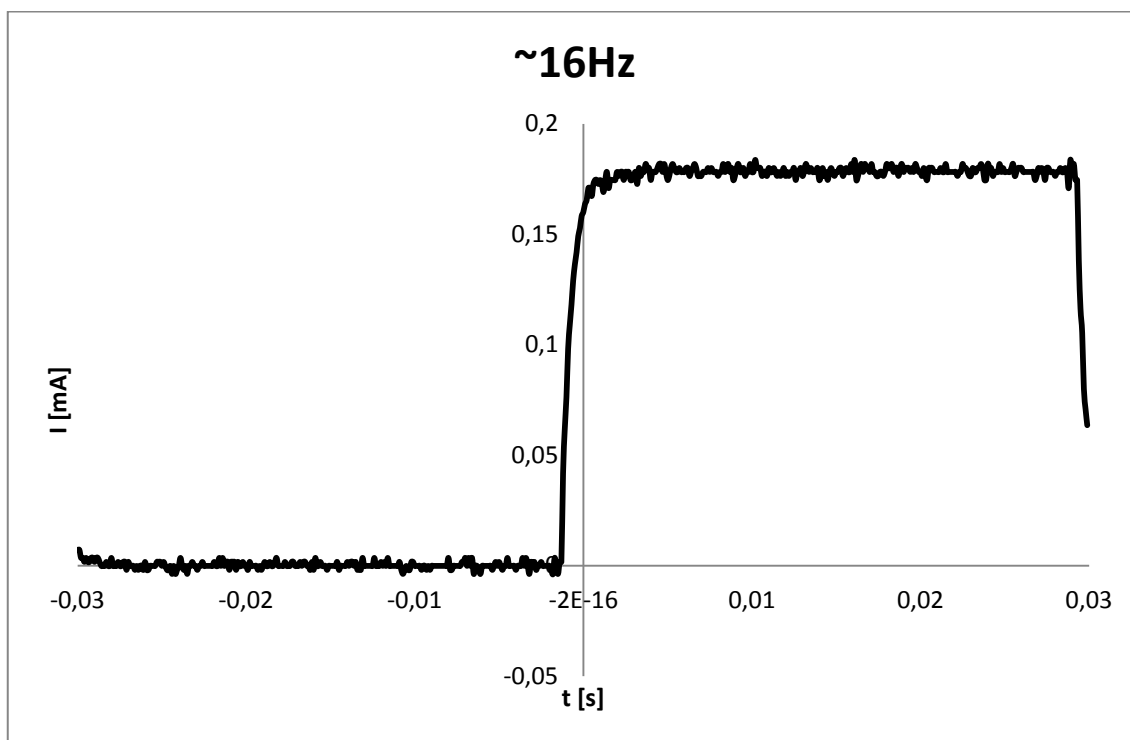
	INA331	AD8231-EP	LMP8358
Minimální zesílení [V/V]	5	1	10
Nastavení zesílení	Rezistory	Paralelní	Sériové/Paralelní
Přesnost zesílení [%]	0,02	0,8	0,25
Nelinearita [ppm/°C]	2	10	100
Šířka pásma [MHz]	2	2,7	8
Vstupní napěťový offset [μV]	250	15	10
Maximální zesílení (zahrnuje chybu zesilovače a rezistorů)	592,277	807,75	401,977

V tabulce výše (Tab. č. 2) jsou uvedeny maximální hodnoty uvedené výrobcem. Maximální zesílení bylo vypočítáno z těchto údajů a zahrnula se tolerance rezistorů na vstupním offsetu. Pro návrh byl zvolen obvod LMP8358. Přestože součástka dopadla nejhůře oproti ostatním, je to dáno garancí rozsahu hodnot specifikovaných výrobcem v celém teplotním rozsahu. V udávaných typických hodnotách naopak obvod dopadá nejlépe. Z předpokladu, že obvod nebude vystavován vyšším teplotám a teplotním výkyvům, je tento obvod vhodný pro použití do zařízení. Navíc disponuje programovatelným zesílením a nastavitelnými vstupy.

#### ***1.4. Budicí obvod***

Budicí obvod má za úkol ze stejnosměrné složky buzení (proud nebo napětí, závisí na konfiguraci) vytvořit střídavý signál (v jednotkách Hz) pro cívky. Pro výstupní obvod byly zvažovány dvě varianty. První varianta (doporučená vedoucím práce) zahrnovala osazení buzení výkonovým audio zesilovačem typu D. Jako vstupní signál pro zesilovač by se využilo buď signálů z mikroprocesoru o hodnotě 3,3 V, nebo by se přidal dvoukanálový digitálně analogový převodník, který by umožňoval výstupní obvod regulovat. Zkušební měření proběhla na obvodu TPA3121D2 [10].

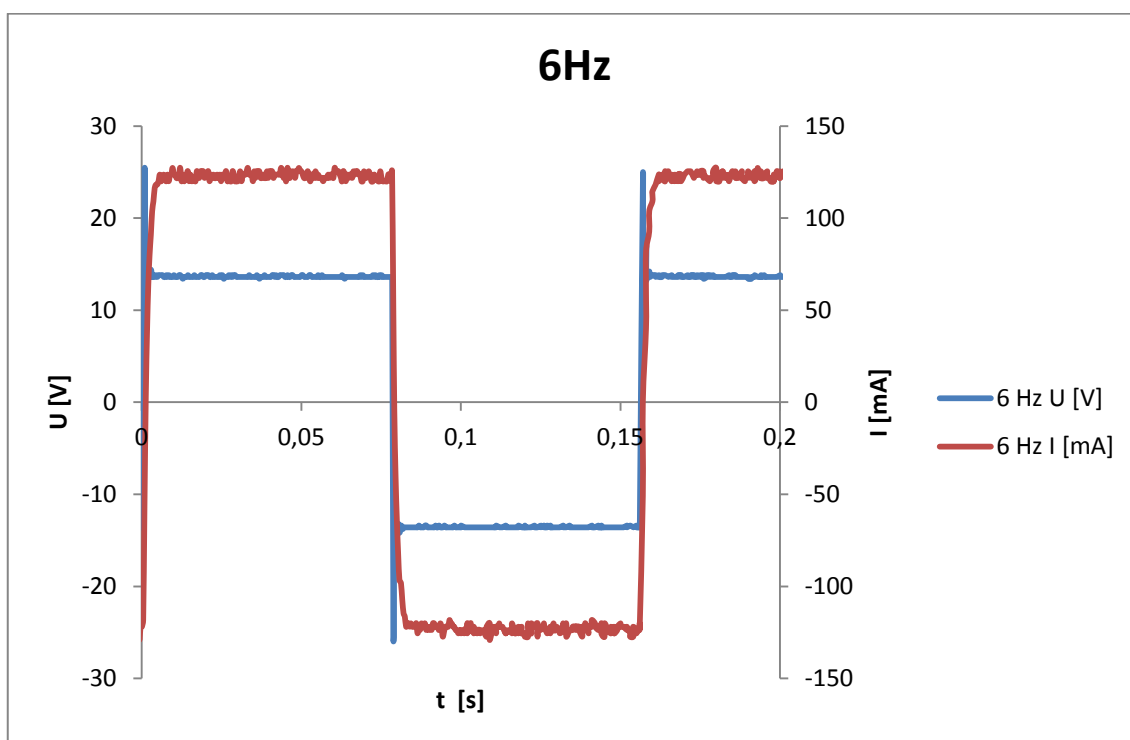
Výsledky byly povzbudivé a při vstupním napěťovém signálu 5 V (buzeno zdrojem) se dosáhlo vhodné strmosti hrany a výstupního proudu přibližně 170mA (jednalo se o orientační měření pro ověření myšlenky). Naměřený průběh je na obrázku níže (Obr. č. 6). Na výstup zesilovače byl připojen sériově odpor, na kterém se měřil za pomoci osciloskopu úbytek napětí. Napětí se posléze přepočítalo na hodnoty proudu.



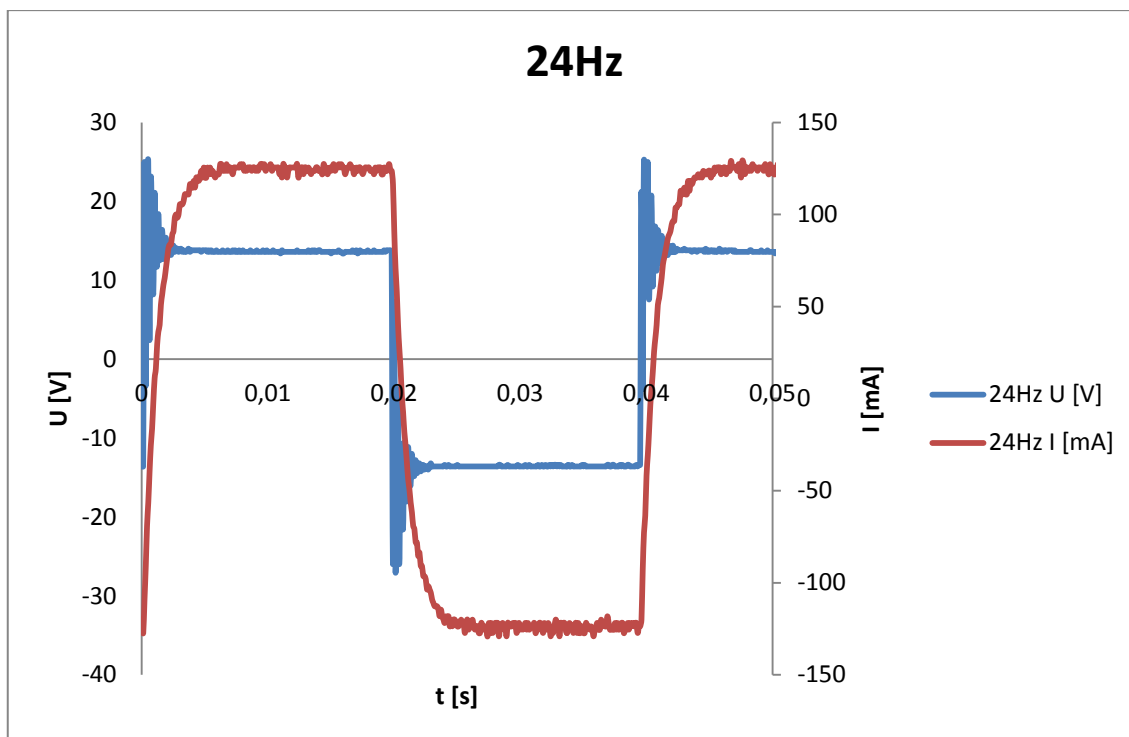
*Obr. č. 6 - Buzení pomocí zesilovače typu D (vstup 5V, 16Hz)*

Druhé měření bylo s nižším napětím (3 V) pro ověření, zda by signál pro zesilovač nemohl přímo generovat mikroprocesor (3,3 V). Měření bylo provedeno při několika frekvencích. Ze všech ovšem plyne závěr, že mikroprocesor může zesilovač budit přímo. Výstupní proud ovšem klesl na 120 mA. Při zahájení práce byl budící proud zvolen na 125 mA, pokles o 5 mA není pro funkci závažný a lze kompenzovat vyšší citlivostí vstupního obvodu. Na obrázcích níže (Obr. č. 7 a Obr. č. 8) je patrné, že strmost náběžné hrany oproti buzení 5 V je nižší, ale stále v toleranci 15 % z celkového signálu. Zvolenou frekvenční hranicí je 24 Hz.

V dalším kroku byl měřicí odpor připojen mezi výkonovou zem, přístrojového zesilovače a zem obvodu. Takto by byl signál měřen i ve výsledném obvodu. Při následném měření a ověření všech dosavadních výsledků ovšem bylo zjištěno, že na rezistoru není žádný úbytek napětí. Při důkladném proměření obvodu bylo zjištěno, že zesilovač má silovou a signálovou zem propojenou. O této skutečnosti není zmínka v katalogovém listu. Z důvodu tohoto zjištění je tento způsob buzení nevhodný, jelikož měření proudu by bylo komplikované a zvedlo by výrobní cenu. Druhou možností výstupního obvodu byl klasický H-můstek. Z důvodu jednoduchosti a osobních dřívějších zkušeností bylo zvoleno právě zapojení do můstku.



Obr. č. 7 - Buzení pomocí zesilovače typu D (vstup 3V, 6Hz)



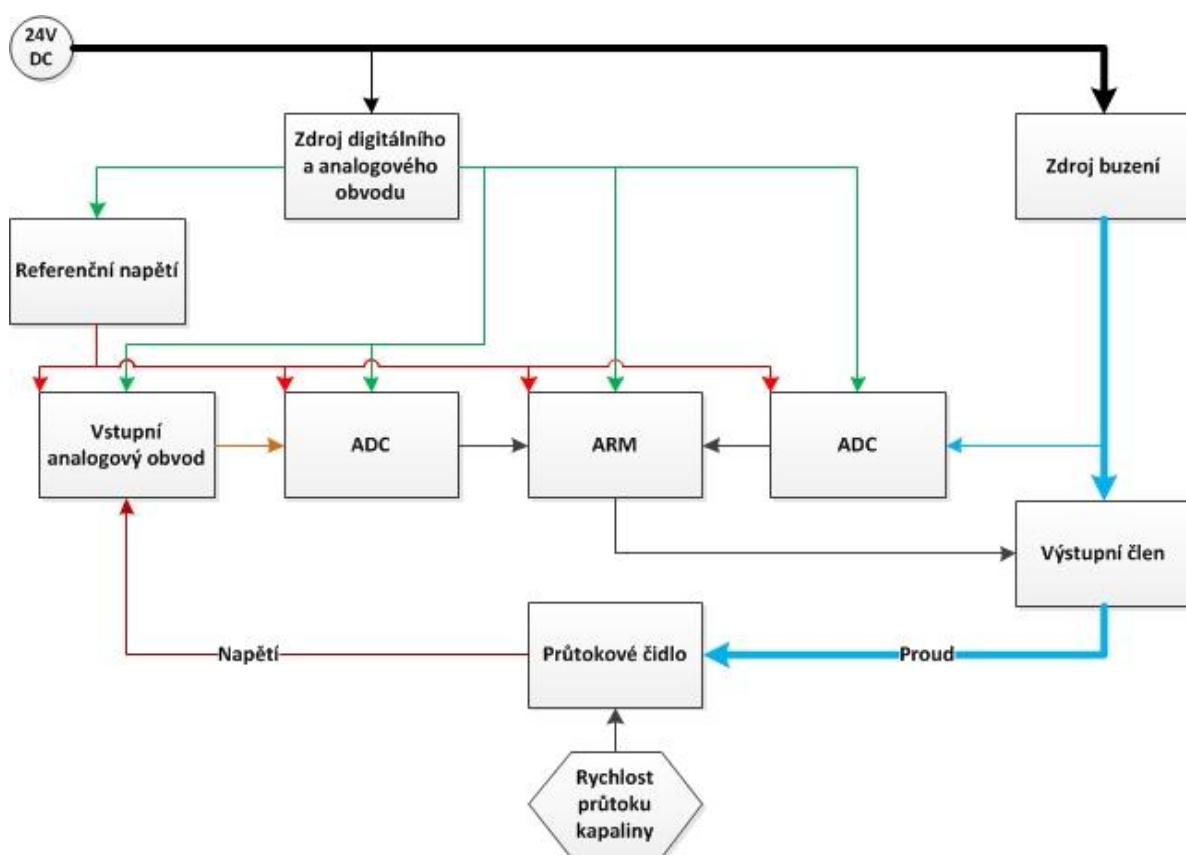
Obr. č. 8 - Buzení pomocí zesilovače typu D (vstup 3V, 24Hz)



## 2. Návrh a realizace

### 2.1. Základní návrh

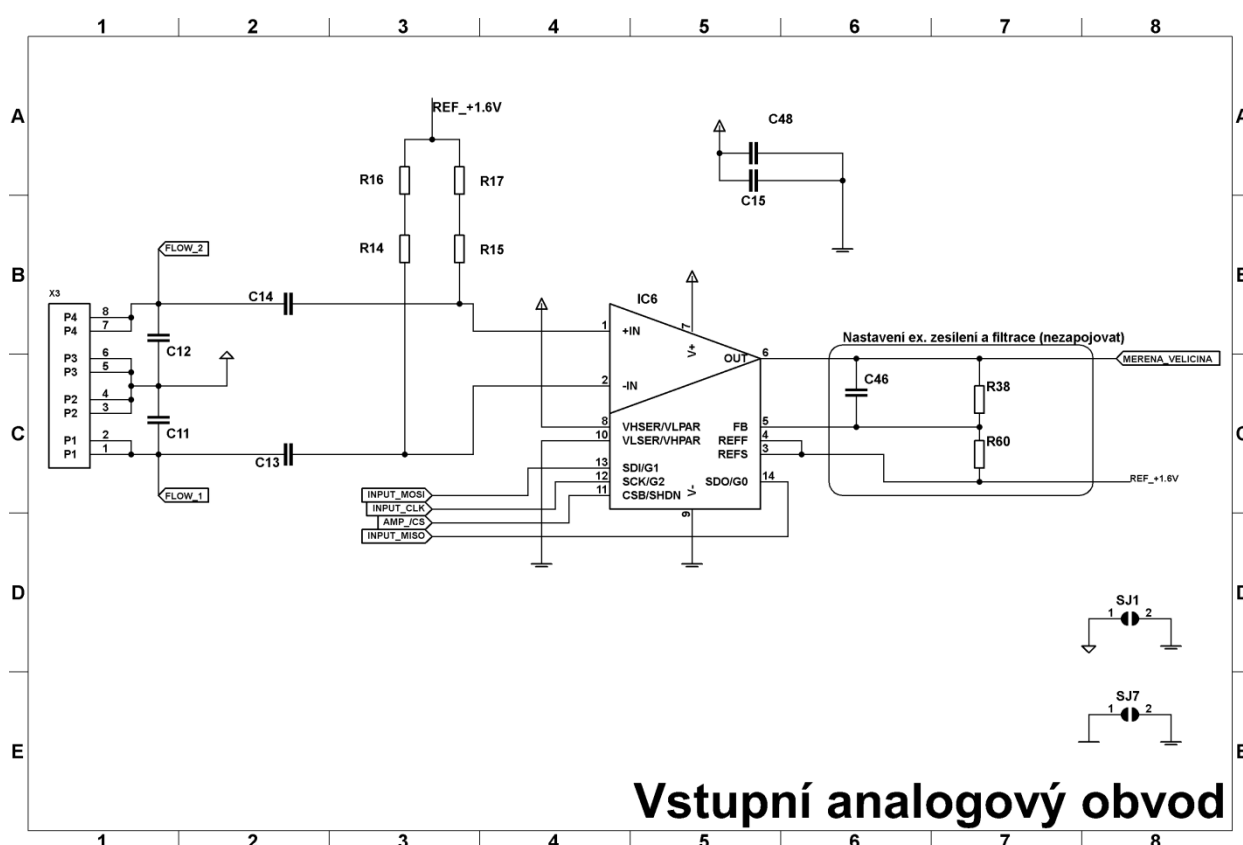
Návrh zařízení je podmíněn co nejvyšší přesností, spolehlivostí a nízkou cenou. Úkolem testeru je měření nízkonapěťového diferenciálního signálu, reprezentující průtok kapaliny v indukčním průtokovém čidle, které má být buzené střídavým zdrojem proudu o konstantní absolutní hodnotě. Na obrázku níže (Obr. č. 9) jsou znázorněny všechny hlavní části. Napájení obvodu je předpokládáno 24V, které je přes dva samostatné obvody upraveno na napěťový a proudový zdroj. První obvod má za úkol napájet digitální a přesné analogové obvody náchylné na rušení. Silně znázorněné spoje značí výkonové propojení (buzení průtokového čidla). Z průtokového čidla je testerem snímáno napětí, které je pomocí analogových obvodů a převodníku převedeno na číslcová data.



Obr. č. 9 - Diagram rozložení návrhu

## 2.2. Vstupní analogový obvod

Vstupní analogový obvod má za úkol zesílit nízkonapěťový diferenciální signál před navzorkováním analogově digitálním převodníkem. To klade na vstupní obvod nároky na přesnost a co nejvyšší zesílení k plnému využití rozsahu převodníku. Níže (Obr. č. 10) je znázorněn návrh vstupního obvodu. Zvolený převodník LMP8358MA má schopnost zesílit vstupní signál až tisícinásobně. Zesílení lze měnit dle potřeby prostřednictvím rozhraním SPI bez fyzického zásahu do obvodu.



Obr. č. 10 - Vstupní analogový obvod

Na vstupu obvodu se nacházejí kondenzátory C12 a C11. Ty slouží jako filtrační kondenzátory pro omezení zanášeného šumu do obvodu. Vazební kondenzátory C14 a C13 mají za úkol oddělit vstupní potenciál. Z důvodu jednoduchosti obvodu, není obvod napájen symetrickým napětím, tudíž vstupní signál nesmí mít zápornou hodnotu napětí, jinak by mohlo dojít ke zkreslení vlivem dolní saturace přístrojového zesilovače (IC6). Proto je do signálu přidána stejnosměrná složka o hodnotě 1,6 V pomocí odporů R16 a R14 pro jednu větev signálu, rezistory R17 a R15 pro druhou

větev signálu. Na výstupu přístrojového zesilovače je obvod připraven na osazení dodatečné filtrace a nastavení uživatelského zesílení, jenž zesilovač umožňuje zvolit i mimo přednastavené kroky. Před zesílením je signál náchylný na rušení, proto na vstupním analogovém obvodu se nachází stínění rozdělené do dvou částí. První část stíní obvod, než je signál vazebnými kondenzátory oddělen a je zanesena do signálu stejnosměrná složka. Druhá část stínění slouží ke stínění zbytku analogového obvodu. Jednotlivá propojení stínění jsou přes propojky SJ1 a SJ7, kde poslední jmenovaná propojka připojuje stínění ke stínění desky. K omezení zanášení rušení pomocí napájení je k přístrojovému zesilovači připojena dvojice blokovacích kondenzátorů.

## ***2.3. Analogově digitální převodníky***

### ***2.3.1. Převod vstupního signálu***

Vstupní signál je po zesílení potřeba navzorkovat za použití analogově digitálního převodníku, od kterého vyžadujeme vysokou přesnost, rozlišení, dostatečnou rychlost a nízkou cenu. Před realizací obvodu není jednoznačně možné určit, který analog-digitální převodník (dále jen převodník) bude dostačující k potřebným požadavkům. Proto byl zvolen kompromis a obvod je navržen pro jednoduchou výměnu převodníků osazených na samostatných deskách. Zároveň bude možné převodníky odpojit a zapojit zesílený signál přímo do A/D převodníku mikroprocesoru. Ten sice nemá potřebnou přesnost, ale mnohonásobně překračuje požadovanou rychlost vzorkování.

Pro možnost připojení libovolného převodníku byly zvoleny potřebné kontakty a přivedeny na desku s převodníkem. Jedná se o dvojici napětí, kdy první slouží k napájení převodníku o velikosti 3,3V a druhého referenčního napětí 2,5V. Dále je přivedeno rozhraní SPI. Z důvodu budoucího rozšíření o zatím nespecifikovaný typ převodníku, je přiveden ještě pin z procesoru navíc, který nemá momentálně za úkol žádné řízení převodníku. Tento pin byl zvolen tak, aby bylo možné po přivedení vstupního zesíleného signálu měřit pomocí integrovaného převodníku přímo

mikroprocesorem. Propojení není trvalé z důvodu omezení rušení, které by to zaneslo do signálu, jestliže by se měřilo přidaným převodníkem s vyšší přesností.

### **2.3.2. Měření budícího proudu**

Z důvodu výpočtu průtoku je zapotřebí znát přesnou hodnotu budícího proudu. Ten je ovlivněn budícími cívkami, spínacími prvky a způsobem přepínání buzení. Proto je do budícího obvodu připojen analog-digitální převodník, který měří napětí na sériově zařazeném odporu. Jestliže je odpor znám a změříme hodnotu úbytku napětí na odporu, lze Ohmovým zákonem vypočítat protékající proud. Pro měření proudu byl zvolen rychlý a přesný převodník AD7683[11]. Z důvodu snížení ceny byla zvolena i varianta měření pomocí převodníku v mikroprocesoru, který pro potřebné účely má dostačující vlastnosti (rozlišení 12b).

### **2.3.3. Doplnková měření (auto-dagnostika)**

Pro základní auto-dagnostiku je zapotřebí znát většinu napětí, které se na desce nacházejí a zároveň jejich měření nesmí zbytečně navyšovat cenu. Proto jednotlivá napětí jsou měřena mikroprocesorem, který disponuje dostatkem měřicích kanálů. Některá napětí ovšem nelze připojit přímo k procesoru, z důvodu prodloužení tras, na kterých by se mohlo indukovat rušení. Jedná se o napětí 1,6 V ve vstupním analogovém obvodu, které přidává do měřeného signálu stejnosměrnou složku napětí. Tento problém se vyřešil vhodnou volbou přístrojového zesilovače, který umožní konfiguraci vstupních pinů. Při měření tohoto signálu je ovšem nutné odpojit buzení, aby vstupní napěťový signál nezkresloval měření. Měření poté bude provedeno vstupním převodníkem (kapitola 2.3.1).

Měřit napětí 3V3 a 3V3A nelze přímo, jelikož jejich jmenovitá hodnota překračuje referenční napětí převodníku, je nutné je přes odporový dělič snížit (R88 a R89, R90 a R91). Měřením těchto dvou hodnot lze získat informaci o stavu obvodu a jeli možné měřit. Většina obvodů je schopná pracovat i s napětím pod 2,5 V.

Ovšem takto nízké napětí v těchto dvou větvích by mělo za následek snížení referenčního napětí a znehodnocení měření.

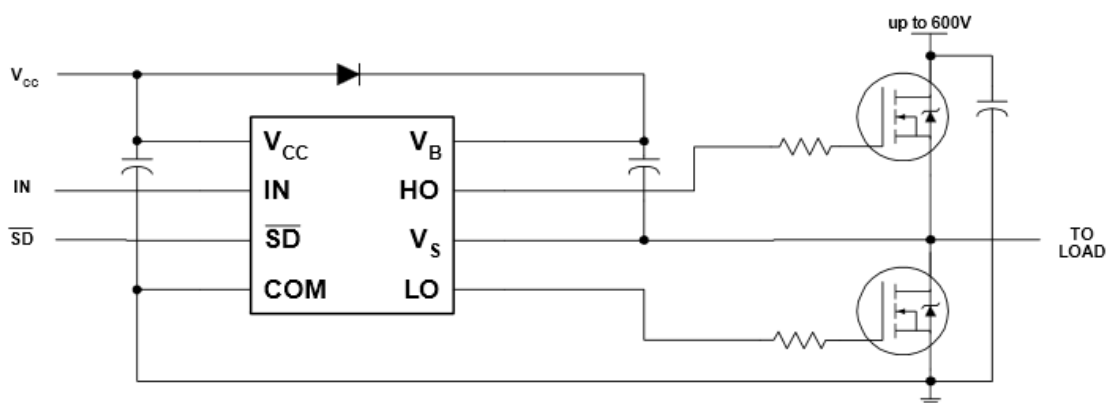
Pro měření napětí budicího obvodu je nutný odporový dělič a to s minimálním převodovým poměrem 10:1, kdy je 25 V převedeno na 2,5 V. Vhodný poměr děliče je 12:1 pro dostatečnou rezervu výchylek napětí (30 V->2,5 V). Jelikož budicí obvod už obsahuje měření proudu, lze určit případné závady v obvodu. Není-li napětí v obvodu, je pravděpodobně závada v napájecí části. Jestliže buzení je pod napětím, ale nezměříme žádný procházející proud při sepnutém H-můstku, pravděpodobně bude přerušen vodič k cívkám. Jestliže by H-můstek měl být odpojen a přesto by buzením protékal proud, je pravděpodobné, že došlo k poškození spínacích tranzistorů.

## ***2.4. Budicí obvod***

Od budicího obvodu je očekávána robustnost a odolnost proti napětovým špičkám způsobené přepínáním napětí na cívce. V jedné z předchozích kapitol (1.4) byl nastíněn důvod pro použití H-můstku namísto zamýšleného zesilovače typu D.

Jak je vidět ve schématu H-můstku (Obr. č. 11), jedná se o zapojení za pomoci obvodů pro půl můstek. Jelikož by mikroprocesor nebyl schopen přímo řídit můstek, z důvodu úbytku napětí řídicího signálu vrchních tranzistorů, který by vznikl v důsledku spínání signálu vůči zemi přes zátěž a spodní tranzistor. Proto byl zvolen budicí obvod pro půl můstky IR2104[12], který se navíc stará o bezpečné spínání, kdy by hrozilo, že se vrchní a spodní tranzistor otevřou zároveň.



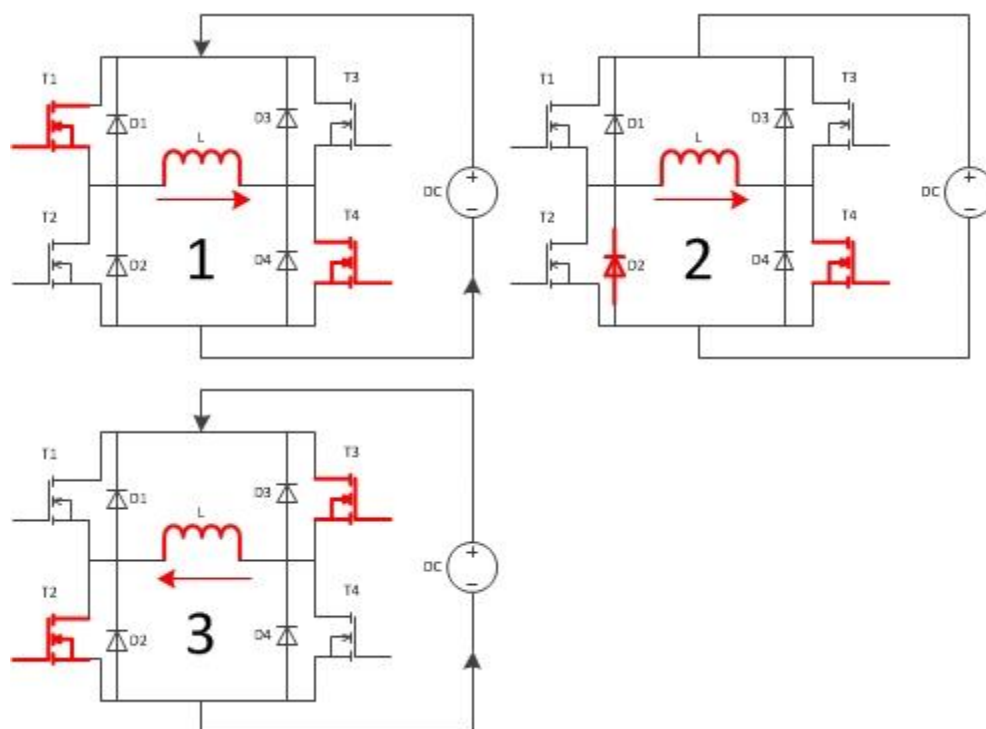


Obr. č. 12 - Doporučené zapojení IR2104[12]

Doporučené zapojení obvodu je obohaceno o filtrační obvody (C28 a R77, C29 a R78) k zamezení poškození budičů tranzistoru vlivem napěťových špiček. Zároveň je do obvodu mezi můstek a zem připojen měřící rezistor (R57 a R58) pro měření proudu buzením. Pro univerzálnost byly použity dvě velikosti pouzdra a to klasické vývodové pouzdro rezistoru nebo v provedení SMD. Pro správnou funkčnost musí být osazen pouze jeden z rezistorů.

Z důvodu spínání indukčností je zapotřebí k tranzistorům přidat nulové diody. Ty jsou v tranzistorech sice implementovány, ale přidané součástky mají lepší vlastnosti. K ochraně pinů Gate proti přepětí, je důležité, aby budiče a tranzistory měly mezi sebou co nejmenší vzdálenost a nedocházelo k indukovaní napěťových špiček. K omezení napěťových špiček bude můstek přepínán s mezikrokem, kdy se energie cívky bude vybíjet a přeměňovat na teplo. Na obrázku níže (Obr. č. 13) jsou znázorněny tři stavy můstku, kde červeně označenými prvky protéká proud a šipka označuje směr proudu indukční zátěží. První stav ukazuje můstek v počáteční poloze, kde proud cívkou protéká jedním směrem, a jsou sepnuty dva spínací prvky. Pro přechod na druhý stav je vrchní tranzistor vypnut, a tudíž je cívka odpojena od zdroje. Energie magnetického pole cívky se začne projevovat generováním vlastního proudu se zachovaným směrem s předchozím stavem, ale opačné polarity napětí. Proud se v tomto stavu uzavírá přes spodní tranzistor a nulovou diodu u protějšího spodního tranzistoru. Zde je vhodné použít samostatných diod (nikoliv integrovány

v tranzistorech) z důvodu lepšího chlazení. Tento mezikrok by měl mít dostatečnou časovou délku alespoň k částečnému vybití cívky. Pro poslední krok stačí sepnout tranzistory, jak je vidět na obrázku.



Obr. č. 13 - Přepínání H-můstku

## 2.5. Napájecí obvody průtokoměru

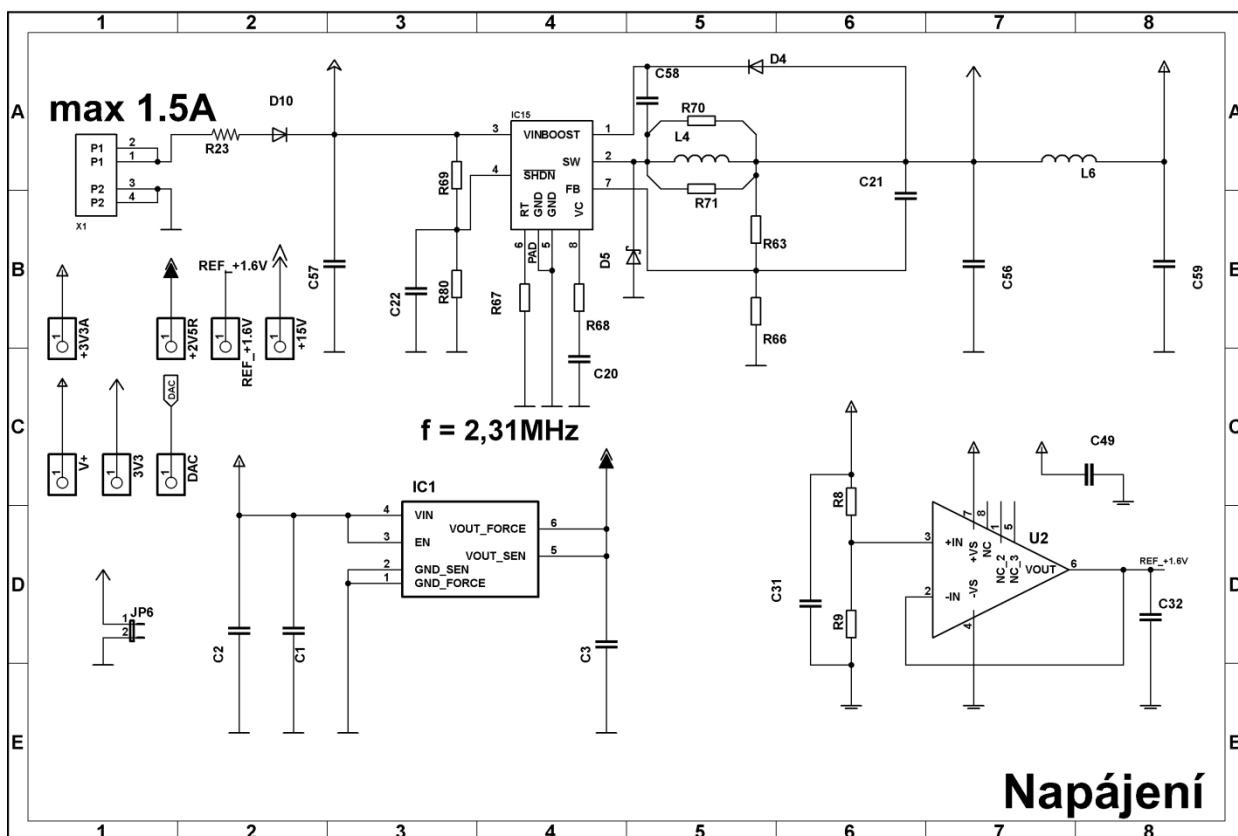
Napájení má za úkol ze vstupního napájení o jmenovité hodnotě 24V vytvořit 3,3V napětí pro logické obvody a referenční napětí pro převodníky. Zároveň má za úkol vytvořit zdroj konstantního proudu pro obvod buzení. Počáteční návrhy předpokládaly samostatné napájení, ale z důvodu snížení výrobních nákladů, zvýšení efektivity a spolehlivosti byl obvod umístěn na společnou desku s měřícím obvodem.

### 2.5.1. Napájecí obvod digitálního a analogového obvodu



Napájení, které můžeme vidět na obrázku níže (Obr. č. 14) je schéma vstupního jištění desky, měřících bodů napájení digitální a analogové části desky včetně referenčních napětí. Vstupní napětí nemusí být striktně konstantní. Navíc klasické stabilizátory by způsobovaly ztráty a zahřívání obvodu. Proto bylo vybráno provedení s DC-DC měničem.

Vstup je jištěn proti přetížení pojistkou (ve schématu je reprezentována odporem R23) a proti přepolarizování je obvod chráněn diodou D10. Prvním integrovaným obvodem je snižující DC-DC měnič LT3505 [13] od firmy Linear Technology. Jedná se o měnič s integrovaným MOSFET tranzistorem s nastavitelnou frekvencí spínání mezi 200 kHz a 3 MHz. Frekvence je nastavitelná pomocí odporu R67 a pro první testovací účely byla zvolena frekvence 2,31 MHz (během testování se může změnit) jako kompromis mezi zvlněním výstupního proudu a generovaným rušením. Maximální proud, který součástka zvládne je 1,2 A. Předpokládaná zátěž obvodu je do 500 mA s displejem (buzení má separované napájení). Vstupní napětí se může pohybovat mezi 3,6 V až do 40 V. Z důvodu bezpečnosti je zapojení doplněno o napěťový dělič (R69, R80 a C22), který zajistí zapnutí měniče až od cca 5,5 V a tím ochrání obvody proti podpětí. Zbylá část obvodu měniče je standardního zapojení. Výstupní napětí je možné nastavit děličem složeného z rezistorů R63 a R66. Požadované výstupní napětí je 3,3 V (označováno jako 3V3). Pro analogové obvody je napájení přivedeno přes cívku L6, která má za úkol zamezit proudovým špičkám (analogové napětí má označení 3V3A).



Obr. č. 14 - Napájecí obvod digitálního a analogového obvodu + referenční napětí [13]

O referenční napětí o zvolené velikosti 2,5 V (označováno 2V5R) se stará obvod ADR3425AR [14] od firmy Analog Devices s označením IC1. Jeho předností je vysoká přesnost ( $\pm 0,1\%$ ) a vynikající teplotní stabilita ( $8\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ).

Posledním obvodem tohoto napájení je napěťový dělič s převodním poměrem 2:1. Z toho vyplývá, že odpory R8 a R9 jsou totožné. Napětí o velikosti přibližně 1,6 V je zapotřebí k zanesení stejnosměrné složky do měřeného signálu (více v kapitole 2.2 Vstupní analogový obvod). K zabránění zatížení můstku a tím změnou žádané velikosti napětí, je za dělič zapojen operační zesilovač v provedení napěťového sledovače.

### 2.5.2. Napájecí obvod H-můstku

Základní myšlenka buzení je generování stabilního konstantního proudu s co největší efektivitou při zbytečném nenavyšování ceny. Základem je opět DC-DC měnič LT3505 jako pro digitální obvod. Jeho zvolení bylo z důvodu velké proudové zatížitelnosti a pro snížení ceny. Jelikož se jedná o zdroj napětí, výstupní zapojení je upraveno. Levný zdroj proudu pro malé proudy se převážně sestavuje z upraveného zapojení lineárních stabilizátorů. Ty mají nevýhodu, že na nich vzniká veliký úbytek, což má za následek vysoké ztráty a ohřev součástky (nutné chlazení). Proto bylo navrženo několik možných variant řešení, které se přenesly do schématu (Obr. č. 15) s možností výběru toho nejlepšího řešení. Všechny navržené varianty jsou naznačeny v tabulce (Tab. č. 3). K ochraně proti přepětí způsobeného cívkou je obvod chráněn usměrňovací diodou (D14).

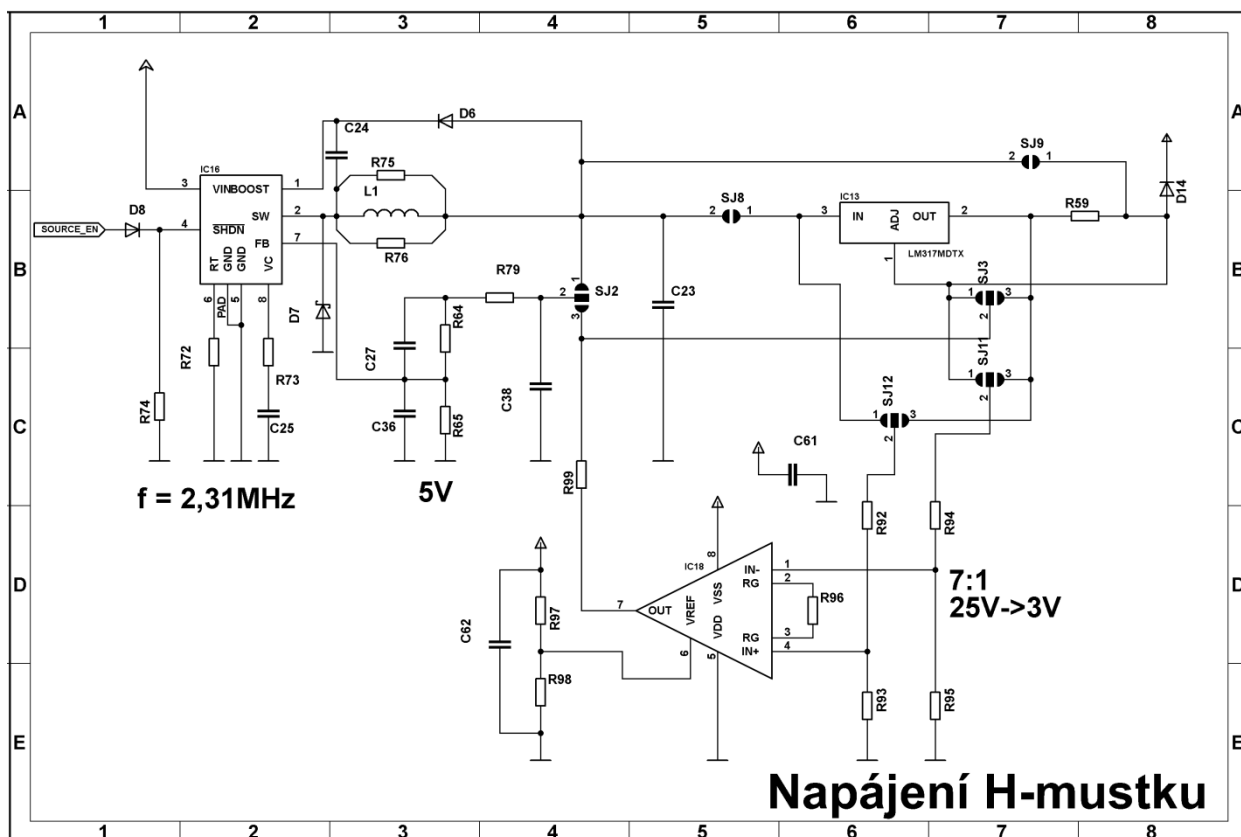
Tab. č. 3 - Konfigurace zdroje buzení

	SJ2	SJ8	SJ9	SJ11	SJ12	SJ13
<b>Lineární stabilizátor jako zdroj proudu</b>	1-2	ON	x	x	x	x
<b>Stabilizátor jako zdroj proudu s konstantním úbytkem napětí</b>	1-2	ON	x	2-3	1-2	x
<b>Napěťový zdroj</b>	2-3	x	ON	x	x	1-2
<b>DC-DC měnič jako zdroj proudu (stabilizátor je odpojen)</b>	2-3	ON	x	1-2	1-2	x

První nastavení má v základu zajistit funkčnost buzení bez ohledu na účinnost v případě, zda se ostatní zapojení neosvědčí. Měnič IC16 je pomocí děliče složeného z rezistorů R64 a R65, přes propojku SJ2-1 (číslo za pomlčkou označuje propojení středového pinu s jedním krajním pinem). Konstantní napětí je přivedeno přes propojku SJ8 na lineární stabilizátor (IC13) LM317. Ten je zapojen jako proudový zdroj a je potřeba ho v tomto konkrétním zapojení chladit. Velikost proudu je zvolena 125 mA pomocí odporu R59, na kterém se stabilizátor udržuje konstantní úbytek.

$$I_{out} = \frac{1,25}{R_{59}} + I_{ADJ} \rightarrow R_{59} = \frac{1,25}{I_{out} - I_{ADJ}} = \frac{1,25}{0,125 - 50 \cdot 10^{-6}} = 10,004 \, \Omega \quad (\text{Eq. 3})$$

Měníč napětí se v tomto zapojení stará jen o vytvoření stabilizovaného napětí, které není nutné a v tomto bodu by nemusel být osazen. Nevýhodou tohoto řešení jsou ovšem vysoké ztráty.



Obr. č. 15 - Napájení H-můstku

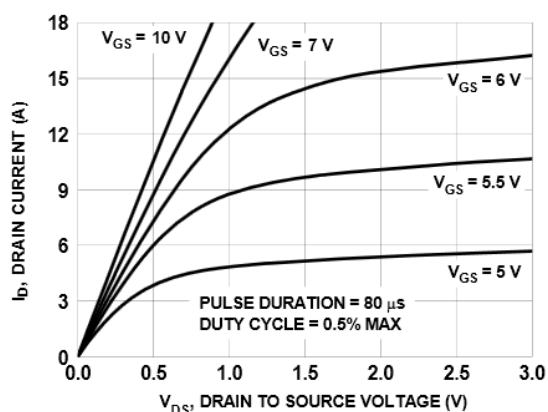
Druhá varianta je podobná první. Znova je zdrojem proudu stabilizátor, ale nyní se na regulaci podílí i měnič, který mění své výstupní napětí tak, aby na stabilizátoru udržoval konstantní úbytek napětí. Jelikož měnič není schopen přímo měřit úbytek napětí na jakékoli součástce, je do obvodu zapojen přístrojový zesilovač AD8226A. Nastavené zesílení odporem R96 je 1 a tudíž slouží jen k získání informace o rozdílu napětí před a za stabilizátorem. Přístrojový zesilovač není schopen měřit napětí, které požadujeme a proto na vstupu jsou umístěné odporové děliče (R92 a R93; R94 a R95). Zesilovače pro vhodná napětí jsou drahé, méně přesné a bylo by zapotřebí vyšší napájecí napětí než poskytuje napájecí větev 3V3. Klidový (rovnovážný) stav na měniči se dá nastavit pomocí odporového děliče (R97 a R98)

vytvářející referenci nebo z poměrů děličů na vstupu zesilovače. Nevýhodou tohoto zapojení je možnost rozkmitání obvodu. Proto je nutné zajistit popřípadě jinou vhodnější variantu zapojení.

Další varianta uvažuje napájení indukční zátěže. Stabilizátor je úplně vypuštěn a měnič je zapojen jako klasický zdroj napětí. Konstantní proud se poté bude udržovat přepínáním můstku. K tomu je zapotřebí znát aktuální hodnotu proudu protékající obvodem, který je již znám (kapitoly 2.3.2 a 2.4). V tomto případě se jedná o jednoduchou variantu, která klade nároky na zpětnou vazbu a spínací prvky. Vyšší spínací frekvence generují větší rušení.

Poslední variantou je experimentální zapojení měniče jako zdroj proudu. Zjednodušeně se znova měnič snaží udržet konstantní úbytek napětí. Nikoliv na stabilizátoru, ale na odporu  $R_{59}$ . Pro realizaci je nutné zamezit vlivu stabilizátoru a proto se předpokládá zkratování pinů 2 a 3 na ploškách stabilizátoru a jeho neosazení. Uvažované nevýhody je možnost rozkmitání obvodu a nepřesnost. Při osvědčení zapojení by výhodou byla vysoká efektivita. Obvod by se mohl pozměnit a využít DAC pro změnu rovnovážného stavu systému. Následkem by byla možnost regulace proudu za chodu zařízení. Pro tyto účely byl vyhrazen jeden DAC převodník a vyveden pro možné požití pro tento účel.

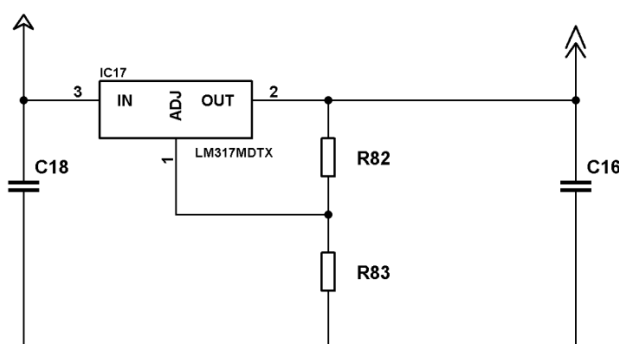
Napájení budičů můstku, nelze napojit na proměnnou hodnotu napětí. Napájecí napětí je úměrné spínacímu napětí tranzistorů. Maximální napětí na Gate tranzistorů je 20 V. Druhým omezením je minimální spínací napětí dané budičem tranzistorů. Jeho nejnižší výstupní napětí je 10 V. Jak je patrné na obrázku (Obr. č. 16), při plánovaném procházejícím proudu 125 mA jsou rozdíly mezi 7 V a 10 V minimální. Dle osobních zkušeností pro bezproblémový chod můstků bylo zvoleno napětí 15 V. Zajišťuje vhodné napájení budičů obvodu, a rychlé nabíjení kondenzátorů. Hodnota není uvedena v grafech v katalogovém listu tranzistoru, nelze ani předpokládat, že se budou charakteristiky značně lišit od hodnot pro 10 V signál na pinu Gate.



Obr. č. 16 - VA charakteristika obvodu FDS89141[15]

K napájení budicího obvodu, generující spínací signály pro tranzistory byl zvolen napěťový nastavitelný stabilizátor LM317 s proudovou propustností 500 mA. Zátěž stabilizátoru je malá, zahrnuje dva budicí obvody s odběrem po 270 uA a dva tranzistorové můstky s odběrem proudu přes pin Gate v hodnotě 100 nA. Výkonnější stabilizátor byl vybrán z důvodu větší odolnosti na proudové pulsy způsobené nabíjením kondenzátorů pro budicí obvody. Zapojení stabilizátoru je znázorněno na obrázku níže (Obr. č. 16). Požadovaná minimální zátěž je 3,5 mA, která je vytvářena rezistory R82 (220 Ω) a R83 (2,6 kΩ) o velikosti 5,3 mA. Ztráty na stabilizátoru předpokládáme tvořené pouze proudem procházejícího děličem (ostatní zanedbáme) a napájecím napětím 25 V. Výslednou hodnotu získáme výpočtem:

$$P_D = (U_{in} - U_{out}) \cdot I_z = (25 - 15) \cdot 3,5 = 35 \text{ mW} \quad (\text{Eq. 4})$$



Obr. č. 17 - Stabilizátor napětí LM317

### 2.5.3. Výkonové ztráty napájení H-můstku

Pro vzájemné vyhodnocení metod z hlediska ztrát je důležité si vytvořit několik předpokladů. Prvním předpokladem je nezahrnutí měniče napětí do vyhodnocení. Vyskytuje se ve všech zapojení a jeho účinnost můžeme předpokládat konstantní stejně jako výstupní napětí 24 V. Druhým předpokladem je zátěž odporového charakteru o velikosti 110  $\Omega$  včetně měřicího odporu. Ztráty na tranzistorech a ochranné diodě D14 pro tento výpočet zanedbáme.

První metoda zahrnovala konstantní výstupní napětí měniče napětí a regulaci proudu obvodem LM317 (zapojení na Obr. č. 15) s odporem o velikosti 10  $\Omega$ .

Výpočet úbytku napětí na stabilizátoru:

$$U_{IC13} = U_0 - U_{59} - U_z = U_0 - U_{R59} - R_z \cdot (I_O + I_{ADJ}) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$U_{IC13} = 25 - 1,25 - 110 \cdot (0,125 + 50 \cdot 10^{-6}) = 9,9945 \text{ V}$$

Výpočet celkových ztrát zdroje proudu:

$$P_{zt1} = U_{IC13} \cdot (I_O + I_{ADJ}) + U_{R59} \cdot I_O \quad (\text{Eq. 6})$$

$$P_{zt1} = 9,9945 \cdot (0,125 + 50 \cdot 10^{-6}) + 1,25 \cdot 0,125 = 1,2498 + 0,1563 \doteq 1,4 \text{ W}$$

Druhý způsob stabilizace uvažoval udržování konstantního úbytku napětí na regulačním obvodu. Tím se ztrátový výkon sníží, ale přidají se do obvodu další ztráty, vlivem přidáním dalších součástek (Obr. č. 15). Předpokládáme, že na obvodu budeme udržovat konstantní úbytek napětí 5 V.

Výpočet napětí na zátěži:

$$U_z = R_z \cdot I_z = 110 \cdot 0,125 = 13,75 \text{ V} \quad (\text{Eq. 7})$$

Výpočet procházejícího proudu a ztrátového výkon na druhém děliči napětí (R94 a R95):

$$I_{D2} = \frac{U_z}{R_{94} + R_{95}} = \frac{13,75}{11000 + 1500} = 1,1 \text{ mA} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$P_{D2} = U_z \cdot I_{D2} = 13,75 \cdot 0,0011 = 15,13 \text{ mW} \quad (\text{Eq. 9})$$

Výpočet procházejícího proudu a ztrátového výkonu na prvním děliči napětí (R92 a R93):

$$I_{D1} = \frac{U_z + \Delta U}{R_{92} + R_{93}} = \frac{13,75 + 5}{11000 + 1500} = 1,5 \text{ mA} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$P_{D1} = (U_z + \Delta U) \cdot I_{D1} = (13,75 + 5) \cdot 0,0015 = 28,13 \text{ mW} \quad (\text{Eq. 11})$$

Výpočet procházejícího proudu a ztrátového výkonu na děliči referenčního napětí (R97 a R98):

$$I_{DR} = \frac{U_{3V3A}}{R_{97} + R_{98}} = \frac{3,3}{22000 + 6800} = 0,0115 \text{ mA} \quad (\text{Eq. 12})$$

Z důvodu nízkého proudu můžeme dělič napětí pro referenci přístrojového zesilovače vypustit. Stejně tak můžeme zanedbat i spotřebu obvodu AD8226, která se pohybuje kolem 350  $\mu\text{A}$ . Výsledný ztrátový výkon vypočítáme:

$$P_{zt2} = P_{D1} + P_{D2} + (\Delta U - U_{59}) \cdot (I_O + I_{ADJ}) + U_{R59} \cdot I_O \quad (\text{Eq. 13})$$

$$P_{zt2} = 0,0015 + 0,0011 + (5 - 1,25) \cdot (0,125 + 50 \cdot 10^{-6}) + 1,25 \cdot 0,125$$

$$P_{zt2} = 0,6278 \text{ W}$$

Třetí způsob zajišťoval konstantní hodnotu proudu za pomoci můstku. V předpokladech jsme ztráty na můstku zanedbali, proto pro tento způsob nebudou výkonové ztráty vypočteny.

Čtvrtý způsob řízení má požadovanou hodnotu proudu udržovat pomocí vstupního měniče napětí, který bude udržovat konstantní úbytek napětí na odporu R59. Výkonové ztráty a napětí na druhém děliči napětí (R94 a R95) jsou shodné s výsledky z druhého řešení, kdy se reguloval úbytek napětí na stabilizátoru napětí na rezistoru. Tudíž nám zbývá určit hodnotu napětí před rezistorem. Úbytek na rezistoru R59 si můžeme zvolit. Ovšem to by znamenalo měnit oba děliče napětí.



S toho důvodu na rezistoru ponecháme úbytek napětí 1,25 V. Výpočet pro nové napětí zdroje a výkonové ztráty na prvním děliči (R92 a R93):

$$U_0 = U_z + U_{R59} = 13,75 + 1,25 = 15 \text{ V} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$P_{D1} = \frac{U_0^2}{R_{92} + R_{93}} = \frac{15^2}{11000 + 1500} = 0,018 \text{ W} \quad (\text{Eq. 15})$$

Celkové ztráty:

$$P_{zt3} = P_{D1} + P_{D2} + \frac{U_{R59}^2}{R_{59}} = 0,018 + 0,01513 + \frac{1,25^2}{10} = 0,1894 \text{ W} \quad (\text{Eq. 16})$$

Do tabulky níže (Tab. č. 4) byly znázorněny jednotlivé výkonové ztráty a účinnost napájení bez zahrnutí účinnosti měniče napětí s účinností 75% (pro vstupní napětí 24V).[13] Nejvýhodněji z vypočítaných variant dopadlo zapojení měniče napětí snažící se udržet konstantní úbytek na rezistoru. Zároveň je toto zapojení jedno z nejtěžších pro správné nastavení. Nevhodně nastavené děliče způsobí nestabilitu a rozkmitání napětí.

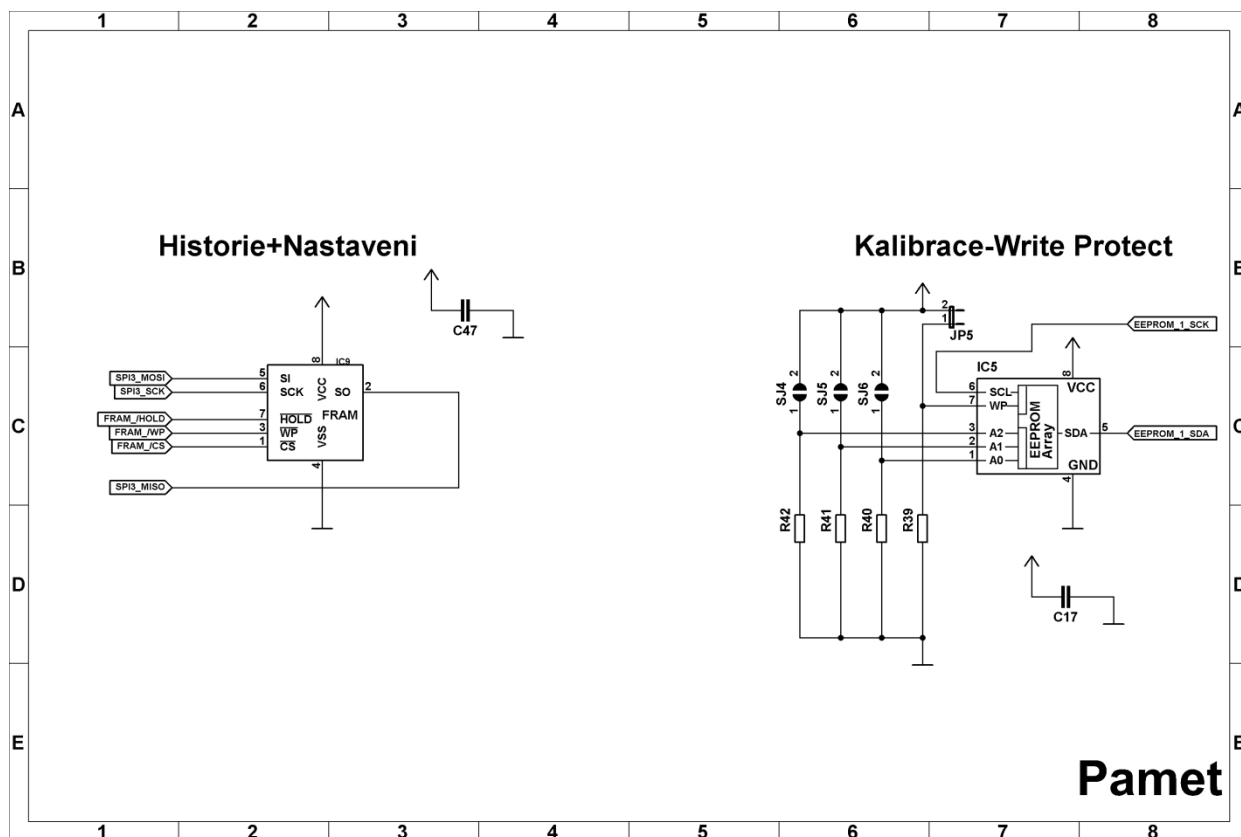
Tab. č. 4 - Účinnosti napájení H-můstku

	P <sub>zt</sub> [W]	η [%]
<b>Lineární stabilizátor jako zdroj proudu</b>	1,4	55,11
<b>Stabilizátor jako zdroj proudu s konstantním úbytkem napětí</b>	0,6278	73,25
<b>DC-DC měnič jako zdroj proudu</b>	0,1894	90,07

## 2.6. Paměť

Zařízení má za úkol měření průtoku, ke kterému pro větší přesnost potřebuje kalibrační konstanty. Pro použití v průmyslu je důležité, aby paměť s konstantami byla ochráněná proti neoprávněné manipulaci. Potřebné ochrany se docílí vybráním paměti s možností ochrany proti zápisu (write protect), která se aktivuje pomocí pinu součástky (často označováno jako WP). K zamezení vypnutí ochrany je tato paměť s možností přepnutí (jumper) zaplombována pod ochranným krytem. Na paměť pro konstanty nejsou kladeny větší nároky na rychlost, kapacitu ani na počet cyklů

přepsání. Jedná se o paměť, kde jsou při kalibraci zapsány data a po delší časový úsek se z paměti pouze krátkodobě čtou data při inicializaci zařízení.



Obr. č. 18 - Paměti

Vybraná paměť 24LC512-I/SM [16] od firmy Microchip (Obr. č. 18; IC5). Jedná se o sériovou EEPROM paměť, která disponuje kapacitou 512kb a rozhraním I2C. K zamezení kolizi adres na sběrnici I2C obvod umožňuje změnu své adresy pomocí změny logických hodnot vstupů A0, A1 a A2. Součástka dovoluje pouze jednu frekvenci sběrnice a to 400kHz, která pro konkrétní potřeby dostačuje. Hlavní výhodou obvodu je životnost dat udávaná výrobcem. Tu deklaruje na více než 200 let. Další výhodou je nízká spotřeba pohybující se kolem 400  $\mu$ A při provozu a 400 nA v pohotovostním režimu.

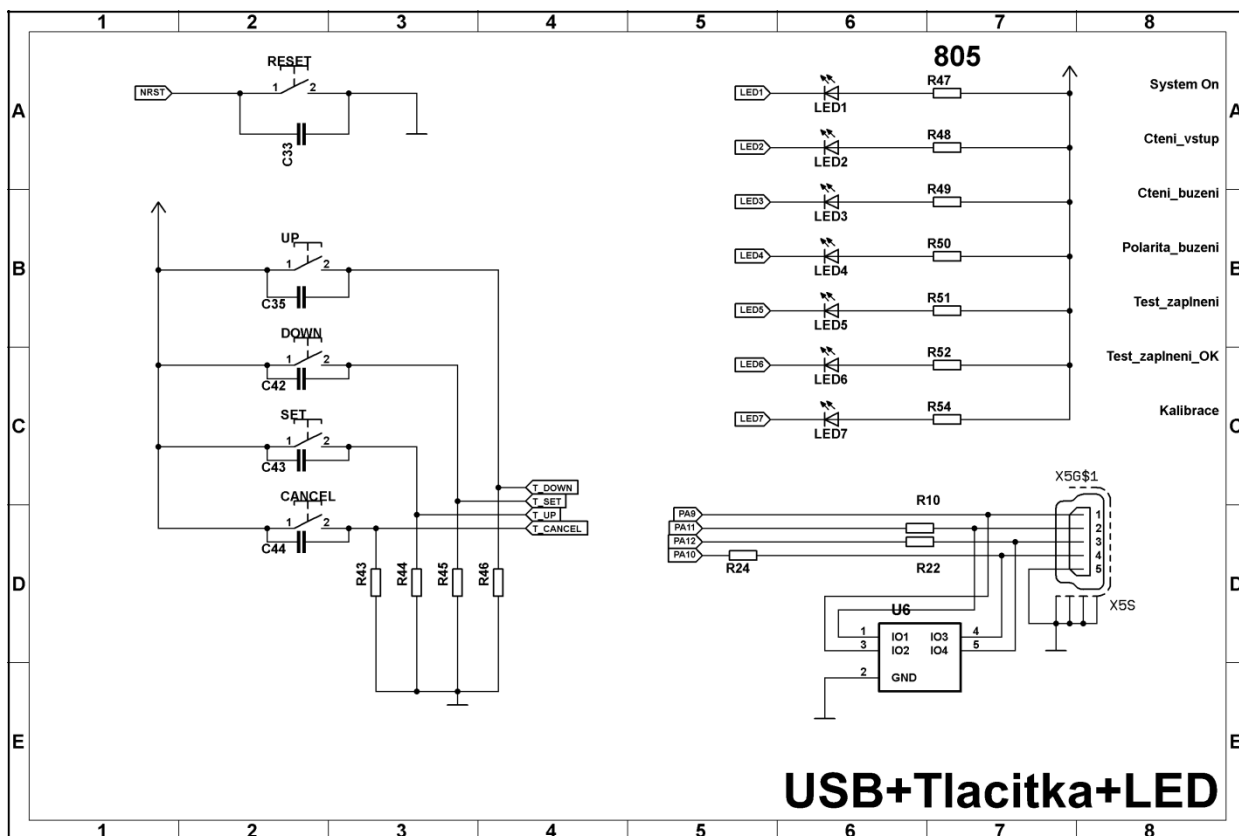
Z důvodu zachování principu chráněné paměti a možnosti ukládat data byla vybrána sekundární paměť MR45V256AMAZAAB (256 kb) [17] od firmy Lapis

Semiconductor (Obr. č. 18; IC9) typu FeRAM (Ferroelectric Random Access Memory) s rozhraním SPI. Spotřeba oproti předchozí paměti nepříznivě stoupla na 10 mA při provozu a na 400  $\mu$ A v pohotovostním režimu. Získané výhody více než kompenzují tento nárůst. Životnost dat deklarovaná výrobcem je 10 let, které je možné zapisovat/číst pomocí rozhraní SPI rychlostí 15MHz. Počet zápisů/čtení se dle katalogu pohybuje  $10^{12}$  cyklů. Hlavním úkolem této paměti bude uchovávat historii dat.

## ***2.7. Uživatelské rozhraní***

Zařízení má pracovat zcela samostatně a k tomu je zapotřebí základní uživatelské rozhraní pro možnost nastavení a odečtu naměřených dat, které můžeme vidět na obrázku níže (Obr. č. 19). Na obrázku není znázorněno připojení LCD.

Pro základní a rychlou signalizaci stavu přípravku je osazená sedmi LED diodami. Popis významu jednotlivých LED diod nalezneme v tabulce níže (Tab. č. 5). Nejsou určeny k odečtu měřených veličin, ale k rychlému vyhodnocení stavu přípravku. Význam jednotlivých LED diod se v průběhu vývoje softwaru může změnit dle potřeby, a tudíž není závazný.



Obr. č. 19 - Ovládací rozhraní

Tab. č. 5 - LED signalizace (verze systému ke dni 2.2.2013)

Označení	Funkce
LED 1	Systém zapnut
LED 2	Čtení vstupního signálu (externí ADC)
LED 3	Čtení budícího proudu (externí ADC)
LED 4	Polarita buzení
LED 5	Test zaplnění
LED 6	Test zaplnění v pořádku
LED 7	Kalibrace

Další vizuální prvek je grafický, monochromatický a podsvícený LCD displej (EA GE128-6N9V24). Disponuje rozlišením 128x64 pixelů a rozhraním USART. Obsahuje instrukce pro vykreslování obrázků, textu a progres barů. Displej je primárně určen na rozhraní RS232, ale zároveň je připraven k odpojení převodníku signálů a přímé připojení na USART k řídícímu mikroprocesoru s TTL logikou. S vypnutým

osvětlením displeje odebírá při 3,3 V pouhé 2 mA. Se zapnutým osvětlením stoupne spotřeba na 15 mA. Hlavní výhodou displeje jsou integrované funkce pro text a fondy. Řídící mikroprocesor přípravku je tudíž nemusí obsahovat. Nevýhodou jsou ovšem relativně dlouhé časy zpracování příkazů displeje (desítky-stovky milisekund). Tudíž je zapotřebí USART s řízenou zprávou přenosu, aby nedocházelo k přetečení interní vyrovnávací paměti displeje a chybné interpretaci dat.

Pro základní ovládání je na přípravku osazena čtveřice mikrotlačítek. Jejich hlavním úkolem je orientace v uživatelském rozhraní. Za tímto účelem jim byly přiřazeny tyto funkce: Nahoru, Dolu, Aktivuj a Zrušit. K potlačení záskmitů, které by vedly k chybnému vyhodnocení, že tlačítko bylo znova stisknuto, jsou k tlačítkům přiřazeny pull-down rezistory (R43, R44, R45, R46) a sériově připojené kondenzátory (C35, C42, C43, C44).

Posledním rozhraním je mini USB v režimu „Host“ a bude umožňovat základní i rozšířené nastavování zařízení včetně čtení hodnot. K připojení k počítači se nevyužívá žádného převodníku. To umožňuje snížit cenu zařízení a celou komunikaci řídit pomocí mikroprocesoru a případné úpravy provést přímo z řídícího programu.

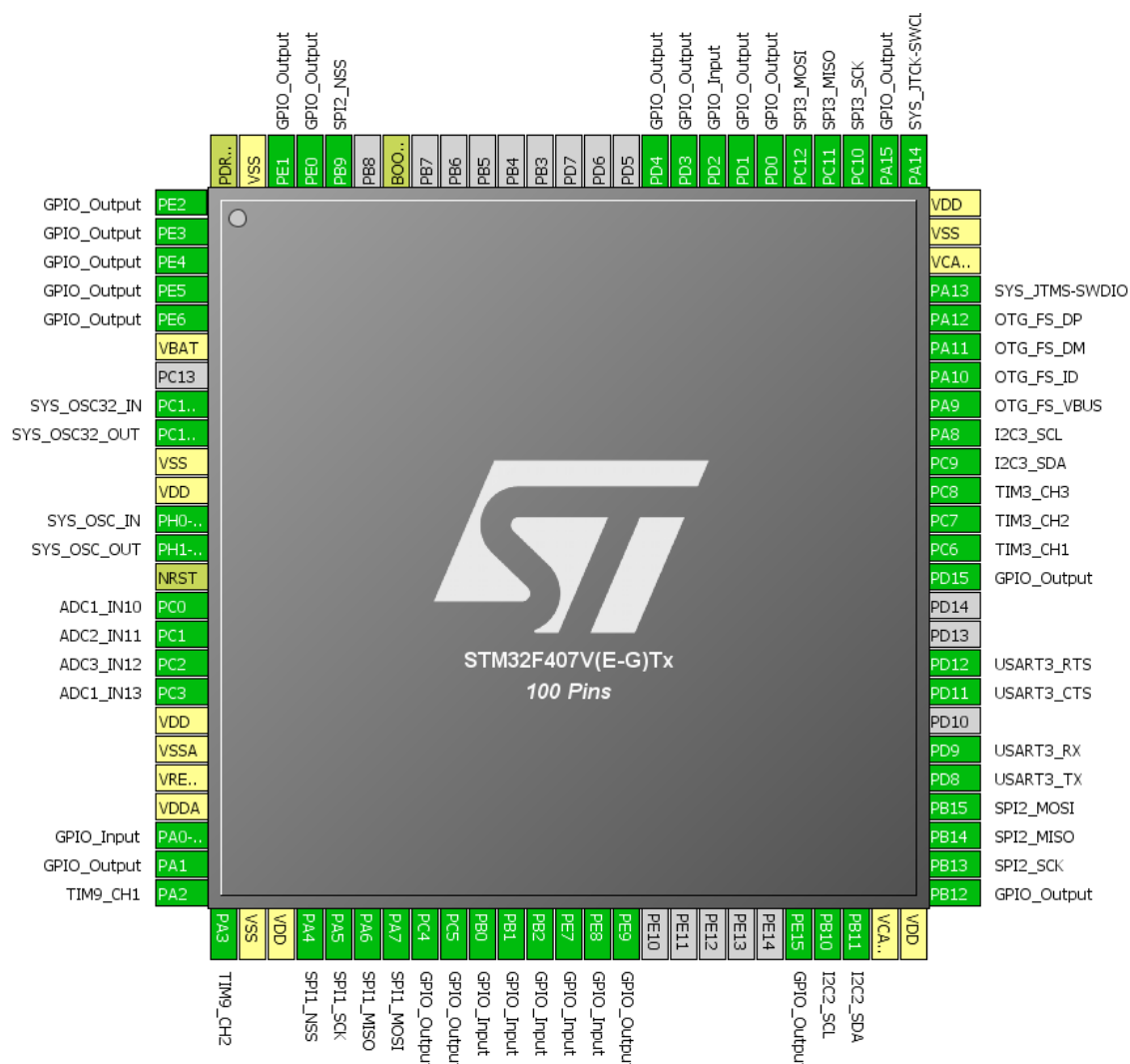
## ***2.8. Řídící mikroprocesor***

Srdcem přípravku je mikroprocesor STM32F407VG s jádrem Cortex-M4F. Pro přehlednost byl při vývoji použit program MicroXplorer, který umožňuje přehledné přiřazení funkcí jednotlivým pinům. Rozložení je patrné na obrázku níže (Obr. č. 20), z kterého je vidět použité periferie a rozšíření. Pro větší přesnost je k mikroprocesoru připojen externí krystal o frekvenci 8MHz zajišťující větší stabilitu v celém teplotním rozsahu oproti integrovanému generátoru hodin.

K mikroprocesoru jsou připojené podpůrné obvody, které umožní použití integrovaný modul reálného času (RTC). Ty se skládají z druhého krystalu a pomocné baterie pro zachování hodin nebo pro udržení specifického registru paměti mikroprocesoru, do kterého by se mohly ukládat klíčové proměnné.

Pro analogově-digitální převodníky jsou použity dva SPI kanály. První je použit pro analogový vstup, který obsluhuje nejen převodník, ale také přístrojový zesilovač. Druhý SPI kanál, je použit pro převodník měřící proud buzením. Převodníky často využívají k signalizaci dokončení převodu změny polarity na pinu MISO pro žádost o generování hodinového signálu na sběrnici. Pro jednoduchou indikaci v programu je pin MISO na obou sběrnicích připojen k dalšímu vstupnímu pinu pro generování příslušného přerušení. Třetí SPI kanál je použit pro paměť typu FeRAM a je vyveden z desky pro budoucí rozšíření. K budoucímu rozšíření je vyvedena většina typů komunikačních periférií. Kromě SPI je vyvedeno I2C a USART.

Programování mikroprocesoru bylo zvoleno pomocí rozhraní SWD. To umožňuje programování, krokování programu a sledování/změnu parametrů z vývojového prostředí. Způsob vyvedení kontaktů nutných pro programování byl zvolen tak, aby byl kompatibilní s vývojovou deskou STM32F4-Discovery kit.



Obr. č. 20 - Připojení mikroprocesoru STM32F407VG (vytvořeno pomocí programu MicroXplorer)

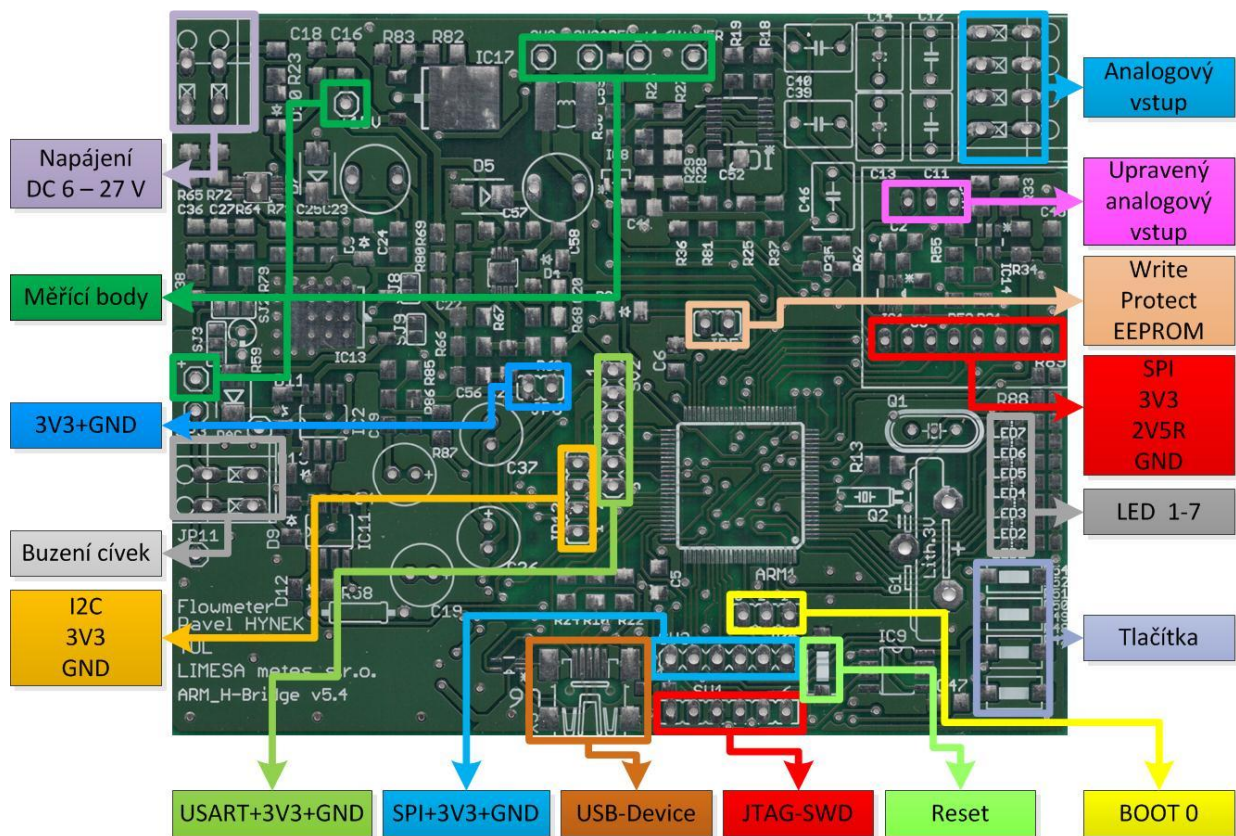
## 2.9. Návrh a rozložení desky plošných spojů

Správný návrh DPS je klíčový pro měření, aby nedocházelo k vzájemnému rušení jednotlivých částí přístroje. Největší rušení generuje budící obvod, který spíná indukční zátěž. Naopak nejvíce citlivá část obvodu je vstupní analogová měřicí část. Z tohoto důvodu je nejvhodnější tyto dvě části prostorově co nejvíce od sebe oddělit. Na obrázku níže (Obr. č. 21) je znázorněno rozdělení desky. V pravé horní části se nachází vstupní analogový obvod. Kde je signál zesílen a vyveden na piny,

kde je umístěn obvod s analogově-digitálním převodníkem na samostatné desce. Prostor pod umístěnou destičkou pro převodník neobsahuje zdroje rušení, ale pouze napěťovou referenci a komparátor. Na desku převodníku je přivedeno rozhraní SPI, které je sdíleno s přístrojovým zesilovačem. Z důvodu umístění poblíž analogového obvodu byla zvolena vhodná frekvence sběrnice pro co nejnižší rušení. Buzení indukční zátěže je umístěno na opačnou stranu desky. To snižuje úroveň vzájemného ovlivnění. Stínění této části desky pomocí rozlévané mědi, je propojeno s centrální zemí desky, co nejblíže ke svorce země napájení.

Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole 2.8, pro budoucí rozšíření obvodu jsou vyvedeny některé periferie. Všechny jsou znázorněny na obrázku níže (Obr. č. 21) včetně měřících bodů a pinů pro nastavení. Měřící body jsou rozmístěny tak, aby byly co nejblíže zdroji, který daný signál vytváří, ale zároveň byla při návrhu snaha tyto body umístit co nejblíže k sobě pro snadný přístup. Měřící body zahrnují napětí s těmi to označeními: 3V3, 3V3A, 2V5R, 1V6, 15V, DAC a střed můstku. Jestliže nezahrnujeme propojky (nejsou zvýrazněny), je možné nastavení desky upravit pomocí jumperů. Jedná se o aktivaci ochrany proti zápisu (write protect) a nastavení BOOT0, který zajišťuje režim pro chod mikroprocesoru.





Obr. č. 21 - Rozložení DPS

## 3. Software

Popis softwaru probíhá v průběhu vývoje a jeho konečná podoba se může lišit od zde popisovaných vlastností a postupů. Hlavním úkolem softwaru vytvořeného v této práci je oživení přípravku a ověření funkčnosti jednotlivých částí. Především oživení buzení a měření vstupního signálu. Řídící program pro mikroprocesor je vyvíjen pomocí programu Atollic TrueSTUDIO for ARM Lite (verze 3.2.0) a počítačové rozhraní prostřednictvím Microsoft Visual Studio 2012.

### 3.1. Řízení buzení

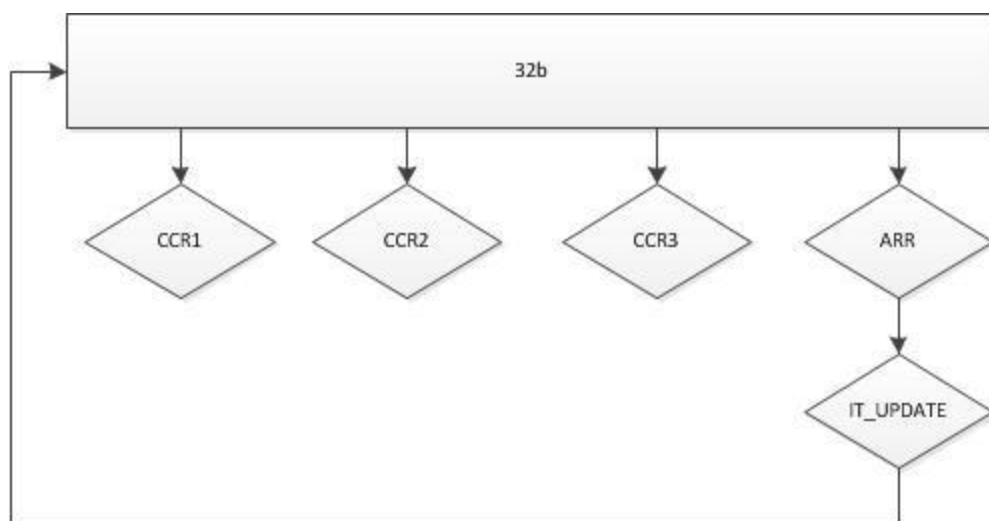
Jednou z nejdůležitějších částí programu je řízení buzení. Musí pomoci řízení omezit rušení (vice v kapitole 2.4) a umožnit uživateli změnit jeho nastavení nejdůležitějších parametrů o posloupnosti kroků a jejich časový interval trvání. Při vývoji programu byl kladen důraz na ovládání pomocí USB, ale s určitými omezeními lze nastavit některé parametry i přes uživatelské rozhraní přípravku (dále bude popisováno pouze ovládání přes USB, které bylo nejvíce testováno).

Tab. č. 6 - Software: Tabulka funkcí buzení

void H_Bridge_Init(void)
void H_Bridge_Start(void)
void H_Bridge_Stop(void)
void H_Bridge_TimeSetV2(void)
void H_Bridge_Set(void)
void H_Bridge_NextStep(void)
void H_Bridge_SetStep(uint8_t Index)
void H_Bridge_PreviusStep(void)
uint16_t H_Bridge_Read(uint8_t Data)
void H_Bridge_Write(uint8_t Index, uint16_t Data)

Nejdůležitější funkce pro buzení jsou vypsány v tabulce výše (Tab. č. 6). První funkcí je *H\_Bridge\_Init*, která zajišťuje inicializaci a přípravu buzení. Inicializuje všechny potřebné piny procesoru pro ovládání budičů můstku a zároveň se připraví časovač a se všemi parametry a přerušeními. Časovač pro buzení byl zvolen 32b Timer5. Vybrán nebyl z důvodu velikosti čítače, ale pro funkci „Capture/Compare channels“ (registry s označením CCR),

která slouží pro vytvoření dalších přerušení v rámci jednoho čítače, aniž by došlo k jeho přetečení. To umožňuje buzení pracovat s proměnnou délkou jednotlivých kroků v rámci jedné periody buzení, aniž by se musel časovač pro každý krok zvlášť nastavit. K tomu je pro 4 kroky zapotřebí v rámci jedné periody buzení 4x vyvolat přerušení. CCR registry jsou celkem čtyři, ale využijeme pouze tři a poslední nahradíme přerušením s označením „Update“, které je volané při přetečení čítače. Jelikož čítač je 32b, dokáže čítat až do hodnoty 4294967295. Přetečení i s maximální frekvencí by pro naše účely trvalo příliš dlouho. K zmenšení velikosti čítače slouží registr „Auto Reload Register“ (ARR). Při dosažení časovače hodnoty v registru ARR se zachová stejně jako by dosáhl maximální hodnoty, vynuluje se a vyvolá přerušení. Nastavení časovače včetně přerušení „Update“ jsou znázorněny na obrázku níže (Obr. č. 22). Pro zjednodušení na obrázku nejsou vyobrazeny ostatní přerušení. Zvolený časovač není jediný, který vyhovuje požadavkům. Rozhraní bylo naprogramováno tak, aby se v případě potřeby uvolnění daného časovače dalo přejít na jiný (s nutností opětovné kompilace programu). To je docíleno vytvořením ukazatele (pointer) na daný časovač, který je použit (z důvodu optimalizace může být tato funkce vypuštěna z finální verze programu). Tudiž stačí přepsat ukazatel, překompilovat program a program pojede na nově zvoleném časovači. Při přechodu se musí dát pozor, jelikož výše zmíněné registry CCR nemá každý časovač, nebo jimi nedisponuje v dostatečném množství. Vhodné časovače pro dané účely v mikroprocesoru STM32F4xx jsou časovače s označením 1, 2, 3, 4, 5 a 8.



Obr. č. 22 - Timer buzení

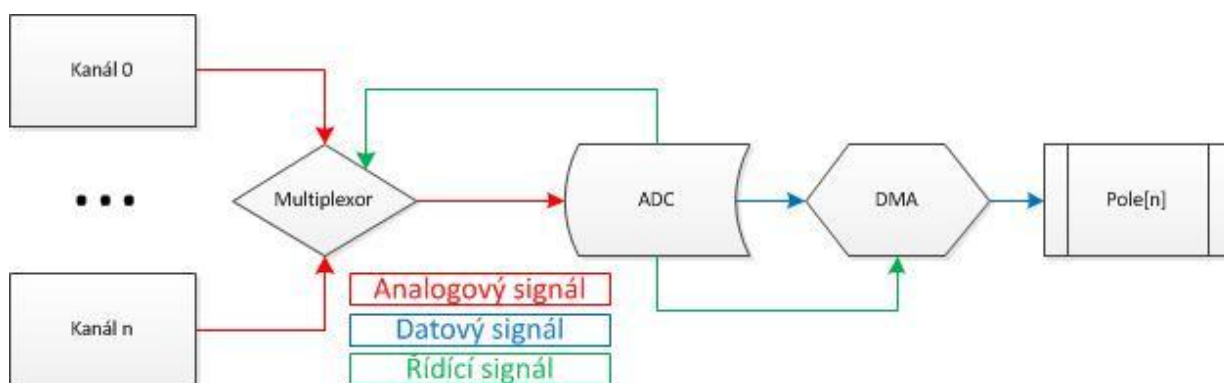
Dalšími funkcemi jsou *H\_Bridge\_Start* a *H\_Bridge\_Stop*. Z jejich názvu je patrné, že spouští a vypínají běh můstku. Při zapnutí H-můstku nepokračuje, ale nastaví se do výchozí pozice a teprve odtud pokračuje dále. Při zastavení můstku jeho výstupní hodnoty nezůstávají, ale můstek je prostřednictvím budičů vypnut. Jestliže by tento stav nevyhovoval, lze ho přenastavit pomocí USB v proměnné *H\_Bridge\_Sequence[0]* (v dalších polích proměnné lze nastavit posloupnost všech dalších kroků). Pro možnost testování při vývoji můstku je program rozšířen o funkce *H\_Bridge\_NextStep* a *H\_Bridge\_PreviusStep*. Ty umožňují jednotlivé kroky procházet. Je nutné mít, časovač vypnut, jinak při dalším vyvolání přerušení bude můstek pokračovat dále v programu. Zároveň není vhodné setrvávat v jedné poloze déle než několik sekund. Kondenzátory budičů H-můstku se postupně vybíjí a dojde k částečnému uzavření jednoho z vrchních tranzistorů. Částečné uzavření zvýší ztráty na tranzistoru a způsobí jeho oteplení.

Funkce *H\_Bridge\_Read* a *H\_Bridge\_Write* slouží k chráněnému přístupu k zápisu a čtení nastavitelným proměnným buzení z jiných částí programu. Jsou určeny především pro rozhraní USB.

### ***3.2. Měření napětí pomocí mikroprocesoru***

Měření napětí pomocí mikroprocesoru bylo zamýšleno jako součást diagnostiky pro usnadnění oživení jednotlivých částí zařízení a zabránění nežádoucích stavů vlivem podpětí. Mikroprocesor obsahuje tři analog-digitální převodníky s šestnácti kanálovými multiplexy. Převodník ADC1 je rozšířený a s jeho pomocí lze měřit i další hodnoty, jako je například napětí baterie pro RTC obvod nebo teplotu mikroprocesoru (nutnost přepočítat). Všechna tyto měření jsou pouze druhořadá a hlavní význam má měření vstupního signálu ze senzoru průtoku. Proto měření nesmí příliš zatížit výpočetní jádro procesoru. Nepoužijeme-li složitějších funkcí, bylo by zapotřebí pro každé měření nastavit příslušný kanál na multiplexu, zkonvertovat hodnotu napětí a uložit do proměnné. Přestože výpočetně se nejedná o složité operace, časově jsou náročné. Konverze analogového signálu na digitální trvá několik cyklů jádra. Jestliže by stačily odhady měřených napětí, vzorkování by mohlo trvat pouze tři cykly jádra. Pro přesnější

měření ovšem může konverze trvat i 480 cyklů. To pro osm kanálů (napětí buzení, proud buzení, 3V3, 3V3A, vstupní signál, teplotní senzor,  $V_{\text{refint}}$  a  $V_{\text{bat}}$ ) může tvořit až 3840 cyklů jádra pro jednu sekvenci měření (pouze měření). Proto byla zvolena možnost využití „scan mode“ režimu převodníků. Jedná se o nastavení posloupnosti sekvence měření předem včetně jejich vzorkovacích časů. Při přečtení hodnoty z převodníku je automaticky přepnut na další kanál dle zvolené sekvence. Nyní když stačí z jednotlivých převodníků pouze číst, nabízí se ideální možnost využít DMA řadič. Ten má za úkol přesouvat data z jedné části paměti nebo periferie do jiné. Nastavení DMA řadiče je složitější, ale jedná se o samostatný blok mikroprocesoru, který je schopen pracovat bez zatížení výpočetního jádra. Diagram takového měření je na obrázku níže (Obr. č. 23). Je patrná připravenost mikroprocesoru pro toto řešení. Převodník po zkonvertování aktivuje DMA, které uloží naměřenou hodnotu do pole. Zároveň se nastaví multiplexor na nový kanál a převodník posléze automaticky začne opět měřit nový signál. Pro takové měření je nutné DMA řadič nastavit tak, aby data četl pouze z jedné adresy periferie a ukládal to do námi zvoleného pole. Délka pole a počet měřených kanálů v rámci jednoho převodníku musí souhlasit. Hodnoty v paměti jsou ovšem v „surové“ formě. Je nutné data přepočítat. To automaticky už není možné provést. Ovšem přepočet proběhne jen v případě, kdy jsou data ve formě napětí opravdu zapotřebí.



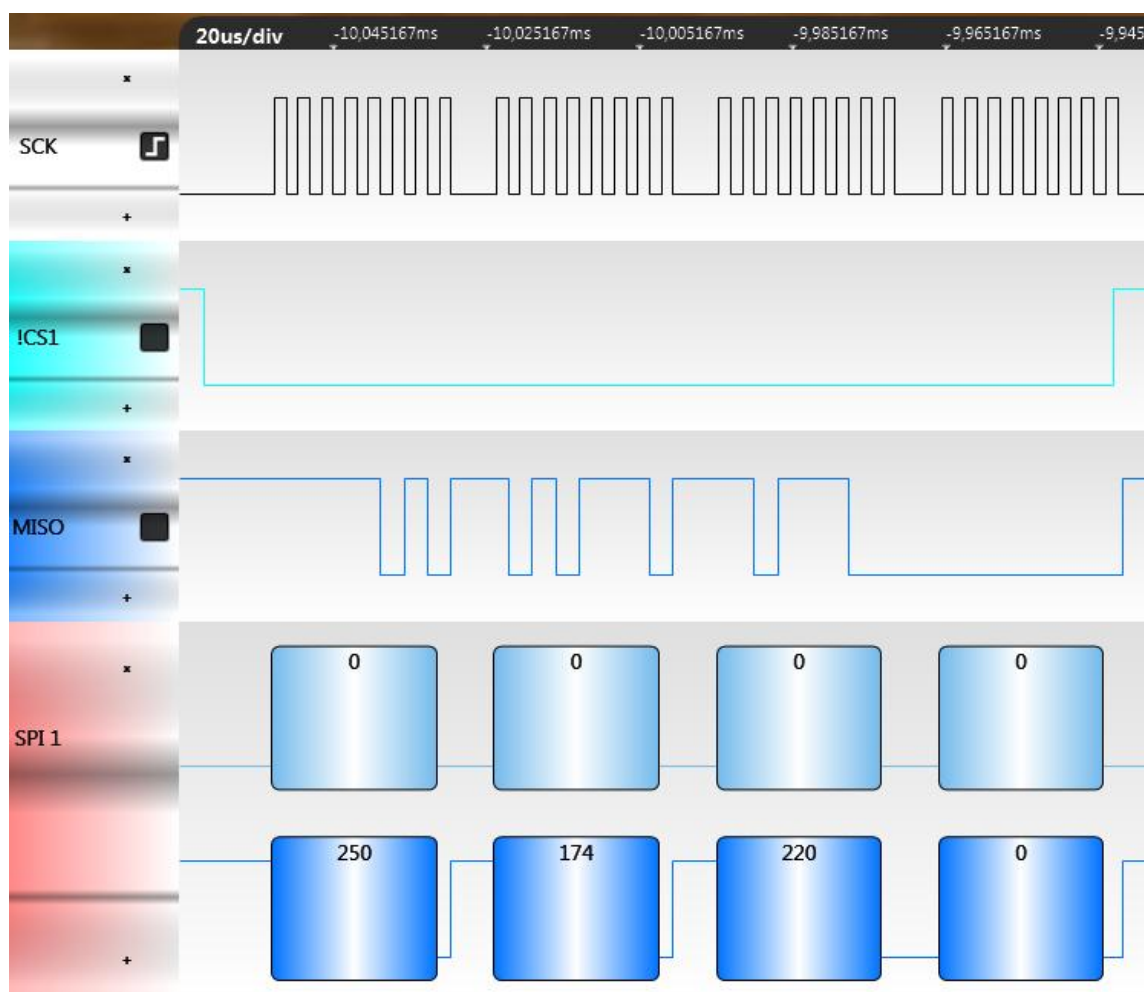
Obr. č. 23 - ADC mikroprocesoru: scan mode+DMA

### 3.3. Měření vstupního signálu (AD7683)

Vstupní signál lze číst pomocí integrovaného převodníku v mikroprocesoru, ale nedosahuje takové přesnosti jako externí převodníky. Pro oživení přípravku a ověření funkčnosti byl zvolen 16b převodník AD7683 [11]. Jeho předností je vysoká rychlost (100k SPS) a jednoduché řízení. Převodníku je pomocí pinu  $\overline{CS}$  přiveden logický signál úrovně nula, značící vybrání převodníku na sběrnici. Po přijetí hodinového signálu po sběrnici SPI, převede vstupní analogový signál na digitální a začne odesílat 16b číslo. Jelikož generování hodinového signálu na sběrnici se uskutečňuje odesíláním prázdného bytu (hodnota 0x00h), musí se hodinový signál posílat tak, aby byly přijaty 3 bajty. S těchto dat se získá 16b číslo rotací registru doprava, tak aby 17b byla první přijatá nula. Poté stačí číslo vymaskovat číslem 0xFFFFh a převést na 16b. Dle katalogové listu je zapotřebí přivést nejméně 22 hodinových pulzů. Pro zachování bezpečné rezervy je program nastaven pro přijetí 4 bajtů (hodinových 32 pulzů). Na obrázku (Obr. č. 24) je zachycen cyklus příjmu dat. Mikroprocesor přijal data (0xFAAEDC00h) a pro zpracování zarotuje s registrem o 10 bitů doprava (0x3EABB7h). Po vymaskování již dostaneme výsledné číslo (0xABB7h). K zjištění vstupního napětí převodníku je použit následující vzorec:

$$u = \frac{U_{ref}}{2^n} * N \quad (\text{Eq. 17})$$

Ve vzorci  $U_{ref}$  je referenční napětí o velikosti 2,5 V,  $n$  je rozlišení převodníku v bitech (16 b) a  $N$  je číslo přijaté převodníkem. Dosadíme-li dle ukázky výsledné vstupní napětí na převodníku je 1676,9 mV.

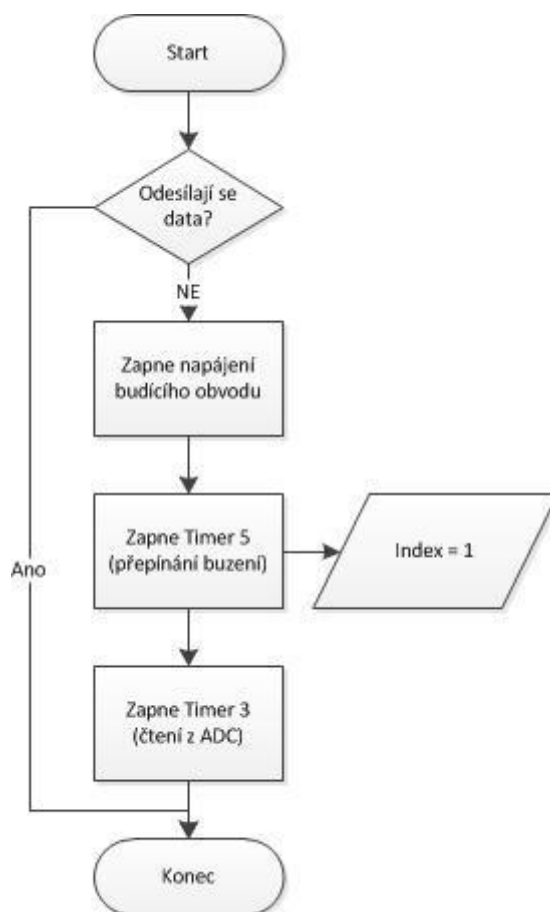


Obr. č. 24 - Příjem dat z AD7683 (snímáno pomocí programu USBee suite)

### 3.4. Algoritmus měření a zpracování dat

Algoritmus pro přijetí dat má za úkol již inicializované prvky spustit a řídit. Pro správné časování je algoritmus rozdělen do tří částí, které na sebe nepřímo navazují skrz proměnné, ale běží samostatně v přidělených přerušení mikroprocesoru. První část algoritmu (Obr. č. 25) spouští měření. Ten ověří, že neprobíhá odesílání dat do počítače, aby nedošlo ke ztrátě informace. Jestliže se data neodesílají, spustí napájení pomocí měniče napětí, který je z důvodu účinnosti a namáhání obvodu (výkonové ztráty) vypnut. Dalším krokem je spustit můstek, který začne na výstupu generovat signál o 14 Hz (v průběhu vývoje se může frekvence změnit, lze změnit i pomocí rozhraní USB). Buzení začíná vždy stejným výstupním stavem. Proto se index

tohoto stavu musí nastavit na číslo 1 bez ohledu, v kterém stavu byl můstek vypnut. Jestliže, buzení pracuje, aktivuje se časovač číslo 3. Ten v přerušení měří vstupní analogový signál a proud na indukční zátěži.



*Obr. č. 25 - Algoritmus spouštění měření*

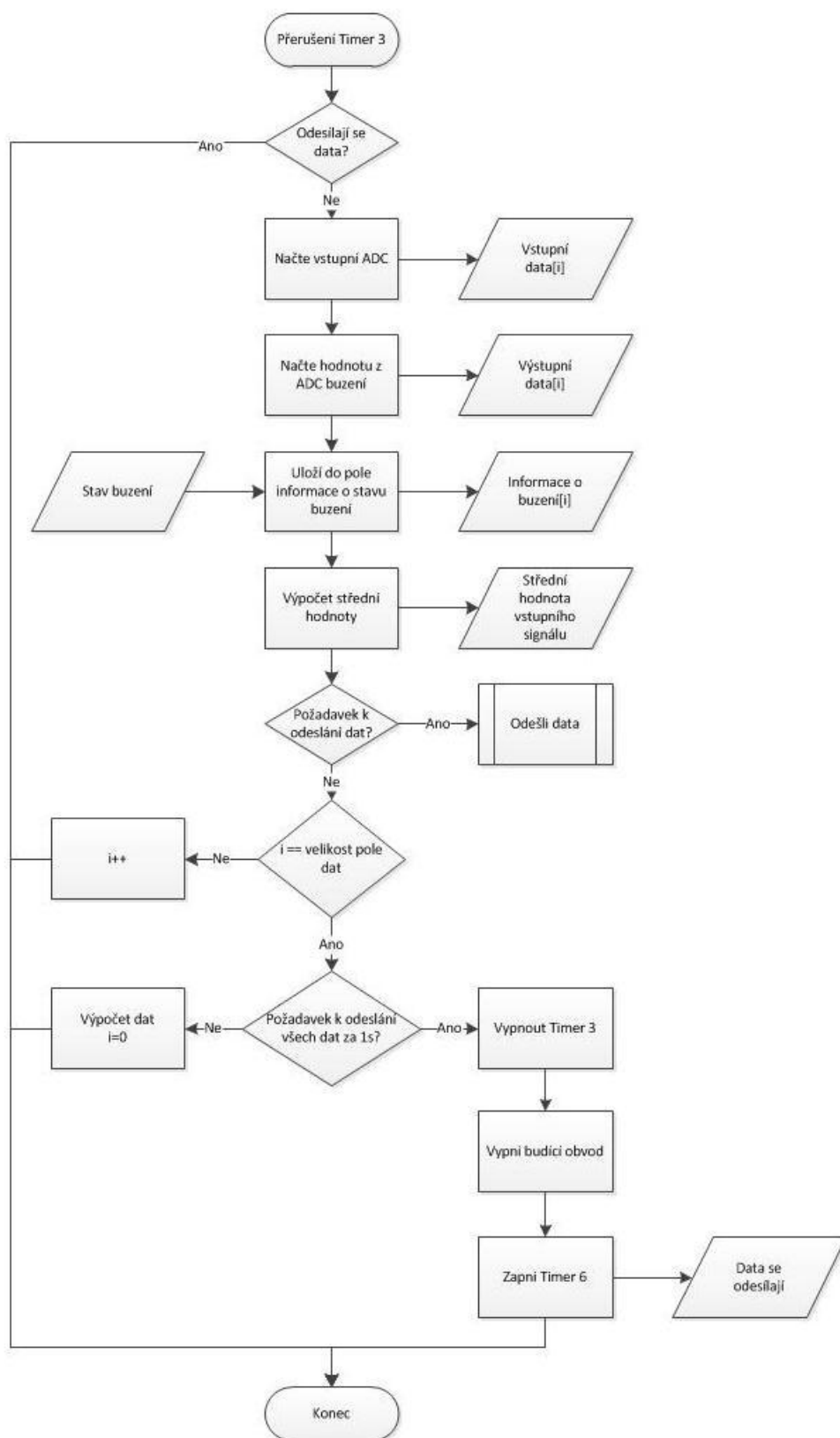
Druhá část algoritmu měření je přepínání můstku, vyvolávaná přerušením časovače číslo 5. Stav můstku je ukládán do globální proměnné, aby k této informaci měl přístup algoritmus pro měření. Sekvence sepnutí lze změnit. V základu bude obvod budit výstup 14Hz z mezikrokem 5% času jedné periody. Mezikrok slouží k vybíjení energie cívky a snížením přepětí při přepnutí do nového stavu (Příloha H).

Třetím algoritmem běžící v přerušení časovače číslo 3 slouží k samotnému měření dat. Po vyvolání přerušení se zkontroluje, zda se neodesílají data, která by algoritmus mohla při jeho provedení ovlivnit. V dalším kroku načte hodnotu z převodníku analogového obvodu a uloží jí do pole, které uchovává data v intervalu



1 sekundy pro závěrečné vyhodnocení. Druhá načtená hodnota je informace z převodníku buzení a uloží se do pole do vyhrazené datové struktury. Obě hodnoty nejsou převedeny na napětí, to by příliš zatížilo mikroprocesor a stouply by nároky na paměť. K informaci o proudu na buzení je přidána informace o aktuálním stavu buzení (sepnutém stavu). Tato informace pomůže eliminovat přechodové stavy při přepínání můstku a vyloučit měřené hodnoty naměřené během mezikroku. Z naměřených dat jsou postupně vypočítávány průměry. Nyní když jsou signály naměřeny, je zkontrolováno, zda nemají být odesílány do počítače. Ten může zaslat požadavek k odesílání každého vzorku, každého stého nebo každého tisícátého vzorku. Nastavení se nezávisle dá nastavit pro analogový a budicí obvod. Během testování se osvědčilo posílat každý tisící vzorek. Jestliže se odesílal každý naměřený vzorek, počítačový program nezvládl data přijmout a docházelo k jejich ztrátě. Aplikace v počítači je psaná více vláknově a k této problematice by teoreticky nemělo docházet. Pravděpodobné příčiny mohou být: nedostatečný výkon notebooku, neoptimálně napsaná aplikace a náročnost ovladačů.

V další části programu je zkontrolováno, zda je pole pro naměřené hodnoty plné, jestliže není, je ukazatel přesunut na další pole a algoritmus je ukončen do doby, dokud není vyvoláno nové přerušení a začne se vykonávat od začátku. Jestliže pole je plné, data jsou zpracována. Z průběžně počítaných průměrů, které jsou pro vstupní obvod rozdělena pro každý stav buzení zvlášť (bez mezikroku), jsou okolo nich stanoveny pásma. Posléze jsou oba průměry spočítány znova, tentokrát jen se vzorky, které do tohoto pásma spadají. Rozdíl mezi těmito dvěma průměry je odeslán dále zpracován nebo odeslán do PC společně s oběma průměry. Po té jsou pole vyčištěny a ukazatel vrácen na začátek a měření začíná od začátku. Je ovšem skrze počítačový program vznést požadavek pro jednorázové měření a odeslání všech dat za 1 sekundu. Jedná se o 2 tisíce měření na každý z obou převodníků a informací o stavu můstku. Tyto data jsou posílána postupně, aby nedocházelo k problémům, které jsou popsány výše.



Obr. č. 26 - Algoritmus měření

### ***3.5. Počítačový program***

Pro přehledné ovládání a zprávu dat a nastavení přípravku a jeho „oživení“ byl vytvořen počítačový program vytvořený v Microsoft VisualStudio 2012 a v programovacím jazyce C#. Program umožnil odstoupit od přímého ovládání pomocí tlačítek na přípravku, které zvládne „simulovat“. Neobsahuje ovšem zpětnou vazbu a tudíž nekontroluje při spuštění nastavení přípravku.

Mezi základní funkce programu patří nastavování H-můstku, kdy ze zadaných parametrů (frekvence, střída, velikosti mezikroku a frekvence čítače) vypočítá nastavení pro jednotlivé kroky a zároveň spočte chybu způsobenou zaokrouhlováním. Tyto data jdou posléze nastavit do přípravku a mikroprocesor se při první změně buzení dle nich začne řídit. Softwarové omezení je nastaveno na maximální frekvenci 50 Hz.

Druhou funkcí je vyčítání dat z interních převodníků mikroprocesoru. Tyto data jsou převedeny na napětí a zobrazeny. Ve výpočtu nejsou zahrnuty vstupní děliče napětí a jedná se o čistě vstupní napětí na převodníku. Další částí je prozatím experimentálně zahrnuto ukládání dat do flash paměti mikroprocesoru. Jedná se o nastavení můstku. Nejen jednotlivé časy korektur, ale i jejich posloupnost. Pro ověření funkčnosti je možné přes program ovládat LED diody. Opět ovšem má algoritmus v mikroprocesoru přednost a změna na diodě je jen dočasná než jí algoritmus přepíše.

Při ověření bylo zahrnuto do počítačového programu i rozhraní pro správu SPI sběrnice včetně její inicializace. To umožňuje z PC odesílat na jednotlivé sběrnice data s výběrem konkrétního zařízení. Přijatá data jsou do PC posílána pouze v případě, jsou-li přijata v rámci požadavku ke čtení daného programu.

Pro otestování analogových obvodů je možné počítačem měnit nastavení vstupního přístrojového zesilovače. Nové nastavení zůstane v zesilovači, dokud ho mikroprocesor nevyhodnotí jako nevyhovující (zesílení). Takto zesílená data je možné do PC posílat. A to buď každá data, nebo každý následující vzorek

v intervalech 10, 100 a 1000 následujících. Předposlední funkcí programu je poslání požadavku do přípravku, který provede měření po dobu jedné sekundy a naměřená data po ukončení měření postupně odešle do počítače. Měření během odesílání dat není možné. Přijatá data se zobrazí v tabulce a obsahují informace o vstupním signálu na vstupním převodníku v mV, budící proud v mA, stav buzení, při kterém vzorky byly naměřeny a zesílení, které v daný moment bylo nastaveno na vstupním zesilovači. Hodnota zesílení by měla být pro celý interval stejná, jelikož vyhodnocení o zeslabení nebo zesílení se provádí až z konečných průměrů po každé 1 sekundě. Naměřená data lze uložit, včetně hlavičky do formátu CSV pro další vyhodnocení.

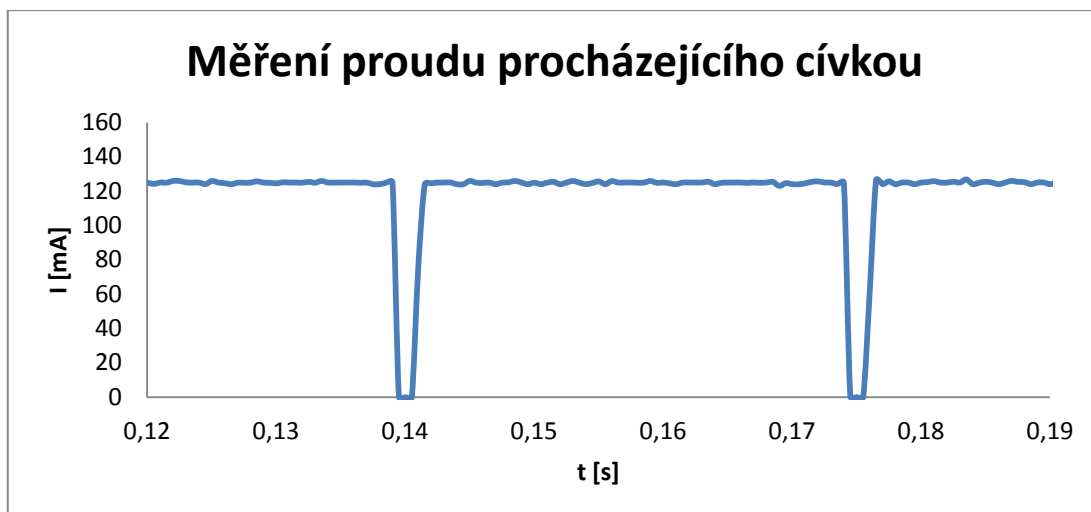
## 4. Měření na přípravku

Jelikož v době zpracování této práce nebylo možné přípravek otestovat s indukčním čidlem průtoku, bylo za pomoci vytvořeného programu naměřeno budící proud se zapojením zahrnující LM317 jako zdroj proudu (Obr. č. 27). Výstupní hodnota proudu se pohybuje v průměru 123,5 mA. Vypočtená střední kvadratická chyba aritmetického průměru je 0,16507 mA, která byla vypočtena za pomoci vzorce:

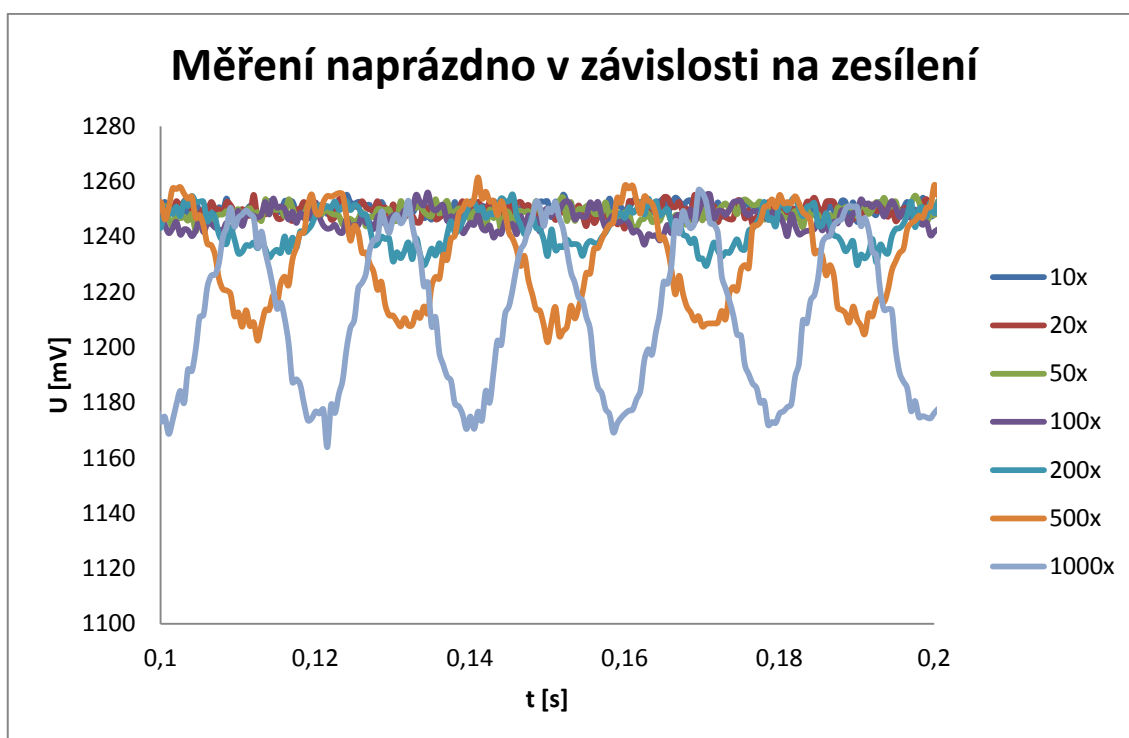
$$\bar{s} = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x_i)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (\text{Eq. 18})$$

Odchylka oproti požadavkům vznikla vlivem výrobních nepřesností, rozlišením a chybou převodníku stejně jako chybou při práci s datovým typem float. Kompenzaci nepřesností proudu, je při výpočtu použita skutečná hodnota naměřená přípravkem.

Druhé měření se zaměřilo na vstupní zesilovač. Jelikož v době zhotovení práce nebylo možné ověřit funkčnost s indukčním snímačem průtoku, vstup je na prázdko a je měřeno vstupní zkreslení za zesilovačem (Obr. č. 28). Pro jednotlivá zesílení jsou v tabulce níže (Tab. č. 7) . Z grafu a tabulky je patrné, že zesílení o hodnotě 1000x způsobuje zkreslení signálu a je vhodné používat zesílení do 500x. Pro správnost a ověření výsledků je nutné měření opakovat.



Obr. č. 27 – Graf: měření budícího proudu



Obr. č. 28 – Graf: měření naprázdno s různým zesílením

Tab. č. 7 - Vyhodnocení měření naprázdno

Zesílení	10	20	50	100	200	500	1000
Průměr [mV]	1250,113	1249,595	1248,764	1246,878	1242,875	1232,035	1213,968
Střední kvadratická chyba průměru	0,044123	0,053712	0,886101	0,085917	0,160025	0,38751	0,896764

## 5. Shrnutí

Práce je zaměřena na návrh a realizaci testeru pro signály z indukčního čidla za využití mikroprocesoru STM32F407. Vstupní napájecí obvody jsou navrženy pro velký napěťový rozsah od 6 V – do 25 V. K správnému buzení cívek se doporučuje napětí 24 V. Pro větší účinnost jsou použity spínané měniče napětí LT3505, které jsou chráněny proti změně polarity na vstupním napětí. Pro napájení cívek byl použit napěťový stabilizátor LM317 v zapojení jako proudový zdroj. Deska je osazena dalšími obvody, umožňující jiné metody proudového buzení, jejich funkčnost je však třeba ověřit v praktickém provozu. Změnu polarizace proudu do cívek umožňuje H-můstek. Řízení můstku je v základním nastavení zvoleno na frekvenci 14 Hz s mezikrokem 5 % periody. Při vlivu síťové frekvence 50 Hz je možno tuto frekvenci softwarově změnit na celistvý dělitel síťové frekvence. Proud procházející cívkou je měřen a zpracován na digitální signál pomocí 16b převodníku AD7683. Získané hodnoty slouží k upřesnění výpočtu průtoku.

Vstupní signál je zesílen programovatelným přístrojovým zesilovačem se zesílením 10 až 1000násobku. Jeho změřené zkreslení při maximálním zesílení, by bylo možné kompenzovat nastavením dalších parametrů zesilovače. Vstupní signál je po zesílení převeden na digitální signál pomocí převodníku, který lze vyměnit, neboť obvod převodníku je umístěn na samostatné desce plošných spojů. Osadit je možné jakýkoliv převodník převodníky s rozhraním SPI. Zapojení umožňuje i měření pomocí interních převodníků, ale je méně přesné a má pouze informativní hodnotu.

Zařízení je možné připojit pomocí USB do počítače a naměřená data uložit ve formátu CSV pro další vyhodnocení. Původní záměr ovládaní přípravku pomocí LCD byl změněn na řízení prostřednictvím USB, které poskytuje uživateli přehlednější formu nastavování a práce s daty. Pro snížení nákladů nebyly do obvodu osazeny paměti a jsou nahrazeny vnitřní 1MB paměti mikroprocesoru. Budoucí osazení pamětí je možné, návrh přípravku s nimi v budoucích rozšířeních počítá.

## Závěr

Výsledkem práce je elektronický tester, který je schopen několika způsoby stabilizovat proud do budících cívek, zpracovat nízkourovňový signál z průtokoměrných čidel a počítačový software, který umožní komunikaci s testerem a zobrazení výsledků.

Vstupní obvod je navržen s variabilním zesílením, které se optimálně přizpůsobuje hodnotě průtoku. Analogově číslicový převodník je umístěn na výměnnou desku pro odzkoušení více typů převodníků s různým vnitřním zapojením, různou vzorkovací frekvencí pro výběr optimálního obvodu z hlediska přesnosti, rychlosti zpracování a ceny. Jako výstupní člen buzení byl zvolen H-můstek s možností napájení z napěťového nebo proudového zdroje. Časy spínání stejně jako metodu spínání lze nastavit v řídicím softwaru. Přestože je použit relativně přesný proudový zdroj, zapojení umožňuje zvýšit přesnost testeru přídatným měřením budícího proudu.

Řídicí mikrorocesor dále umožňuje oddělené řízení jednotlivých větví můstku, co přispěje k nižší úrovni rušivých napěťových překmitů a ke snížení ztrát při přepolarizaci proudu do budících cívek.

Oproti zadání je měřicí obvod navíc doplněn o kontrolu zaplnění potrubí, aby vlivem vzduchových bublin nedocházelo k zanášení chyb.

Tester je vybaven autodiagnostikou, která umožní sledování důležitých napěťových úrovní a zajistí bezchybný provoz. Deska je dále osazena indikačními LED diodami pro rychlý přehled daného stavu.

Pro odečítání a ovládání byl zvolen monochromatický LCD displej v kombinaci se čtyřmi mikrotlačítky. Kalibrační konstanty se ukládají do flash paměti mikroprocesoru a poslední naměřené hodnoty se uchovávají v paměti SRAM. Pro větší konektivitu je deska vybavena sběrnici USB, která je nastavena jako virtuální COM port. V rámci práce byl vypracován počítačový software, který plní úlohu především přehledného zobrazení a ukládání dlouhodobých dat a zároveň je určen pro nastavení parametrů testeru a jeho diagnostiky. Budoucí rozšíření desky o jiné zobrazovací nebo

měřící prvky zajišťují vyvedené periferie (USART, SPI, I2C). Sběrnice USB je připojena k mikroprocesoru bez mezičlenu, lze tedy ovládací program upravit tak, aby byl schopen komunikovat se zařízeními s operačním systémem Android.



## Seznam použité literatury

- [1] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 447 s. ISBN 80-730-0156-X.
- [2] Úvod do architektury Cortex-M3 - díl. 1. *Pandatron.cz - Elektrotechnický magazín* [online]. 2010 [cit. 2013-05-16]. ISSN 1803-6007. Dostupné z: [http://pandatron.cz/?1252&uvod\\_do\\_architektury\\_cortex-m3 - dil. 1.1803-6007](http://pandatron.cz/?1252&uvod_do_architektury_cortex-m3_-_dil._1.1803-6007).
- [3] NXP SEMICONDUCTORS. *LPC1769/68/67/66/65/64/63* [online]. 2009, Revize: 9 2012-8-10. [cit. 2012-12-03] Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/LPC1769\\_68\\_67\\_66\\_65\\_64\\_63.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC1769_68_67_66_65_64_63.pdf)
- [4] ATMEL. *AT91SAM ARM-based Flash MCU* [online]. 2012. [cit. 2012-12-03]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/36/doc11100-52688.pdf>.
- [5] STMICROELECTRONICS. *STM32F302xB STM32F302xC STM32F303xB STM32F303xC* [online]. 2012, Revize 2012-6-7. [cit. 2012-12-03]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00058181.pdf>
- [6] STMICROELECTRONICS . *STM32F405xx STM32F407xx*. [online]. 2011, Revize 2012-5-5. [cit. 2012-12-03]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>
- [7] TEXAS INSTRUMENTS. *INA331; INA2331* [online]. 2001, Revize 2005-5. [cit. 2012-12-14]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina331.pdf>.
- [8] ANALOG DEVICES. *AD8231-EP: Zero Drift, Digitally Programmable Instrumentation Amplifier* [online]. 2011. [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8231-EP.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8231-EP.pdf).

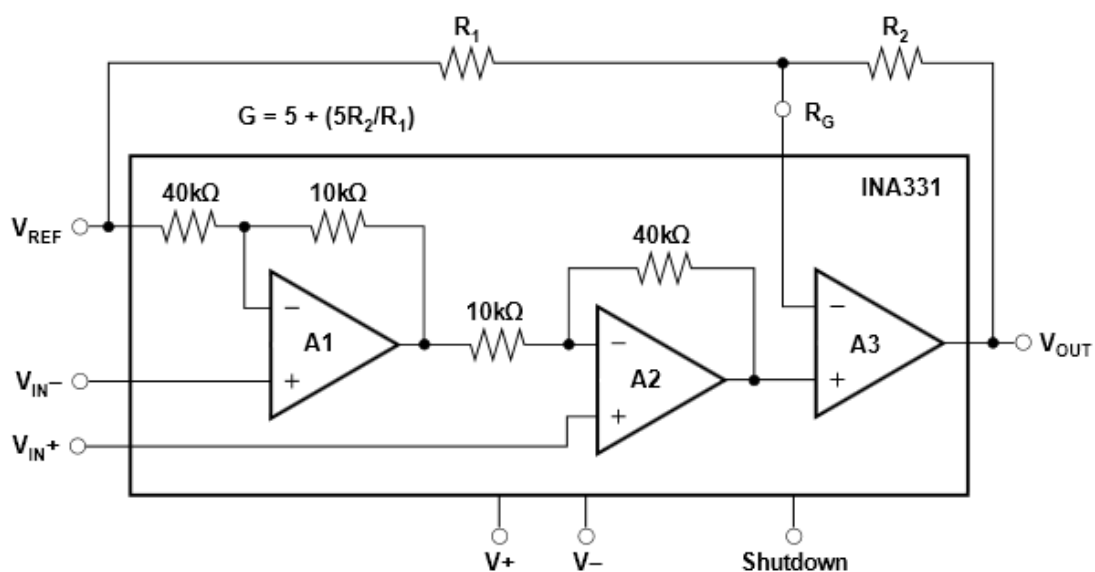
- [9] TEXAS INSTRUMENTS. *LMP8358 Zero-Drift, Programmable Instrumentation Amplifier with Diagnostics*. [online]. 2012. [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp8358.pdf>.
- [10] TEXAS INSTRUMENTS. *TPA3121D2: 15-W STEREO CLASS-D AUDIO POWER AMPLIFIER*. [online]. 2008, Revize 2010-8. [cit. 2012-12-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3121d2.pdf>.
- [11] ANALOG DEVICES. *AD8231-EP*. [online]. 2008. [cit. 2013-1-9]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD7683.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7683.pdf).
- [12] INTERNATIONAL RECTIFIER. *IR2104(S)&(PbF)*. [online]. 2004. [cit. 2012-11-16]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2104.pdf>.
- [13] LINEAR TECHNOLOGY . *LT3505*. [online]. 2006. [cit. 2013-1-20]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3505fc.pdf>.
- [14] ANALOG DEVICES. *ADR3412/ADR3420/ADR3425/ADR3430/ADR3433/ADR3440/ADR3450*. [online]. 2010, Revize B 2010-6. [cit. 2013-1-20]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADR3412\\_ADR3420\\_ADR3425\\_ADR3430\\_ADR3433\\_ADR3440\\_ADR3450.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADR3412_ADR3420_ADR3425_ADR3430_ADR3433_ADR3440_ADR3450.pdf).
- [15] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *FDS89141: Dual N-Channel PowerTrench MOSFET*. [online]. 2010. [cit. 2013-2-13]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/FD/FDS89141.pdf>.
- [16] MICROCHIP. *24AA512/24LC512/24FC512*. [online]. 2012. [cit. 2013-2-5]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21754M.pdf>.
- [17] LAPIS SEMICONDUCTOR. *MR45V256*. [online]. 2011. [cit. 2013-2-5]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1508274.pdf>.

## Seznam příloh:

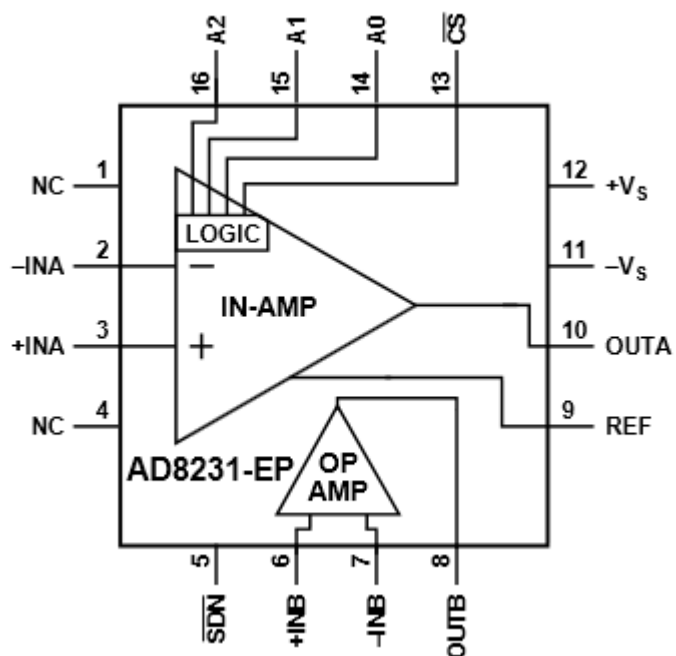
PŘÍLOHA A: PŘÍSTROJOVÝ ZESILOVAČ INA331 [7] .....	67
PŘÍLOHA B: VNITŘNÍ ZAPOJENÍ AD8231-EP [8] .....	67
PŘÍLOHA C: BLOKOVÝ DIAGRAM LMP8358 [9] .....	68
PŘÍLOHA D: NASTAVENÍ VSTUPŮ LMP8358 [9] .....	69
PŘÍLOHA E: KOMUNIKAČNÍ RÁMEC PRO USB .....	70
PŘÍLOHA F: VYUŽITÍ ČASOVAČŮ V MIKROPROCESORU .....	72
PŘÍLOHA G: SIGNALIZACE LED .....	73
PŘÍLOHA H: POROVNÁNÍ BUZENÍ BEZ MEZIKROKU A S MEZIKROKEM (48Hz) .....	74
PŘÍLOHA I: HLAVNÍ DPS TOP A BOTTOM (10 CM X 8 CM) .....	75
PŘÍLOHA J: ROZLOŽENÍ SOUČÁSTEK NA HLAVNÍ DPS (TOP A BOTTOM) .....	76
PŘÍLOHA K: DPS AD7763B 24 MM X 23 MM (POMĚR 2:1) .....	77
PŘÍLOHA L: DPS AD7790 24 MM X 23 MM (POMĚR 2:1) .....	77
PŘÍLOHA M: DPS AD7683 24 MM X 23 MM (POMĚR 2:1) .....	77
PŘÍLOHA N: VYROBENÁ DPS .....	78
PŘÍLOHA O: OSAZENÁ HLAVNÍ DESKA + DESKA PŘEVODNÍKU AD7683 .....	79
PŘÍLOHA P: SAMOSTATNÁ DESKA PŘEVODNÍKU AD7793B .....	81
PŘÍLOHA Q: OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD .....	82

# Přílohy

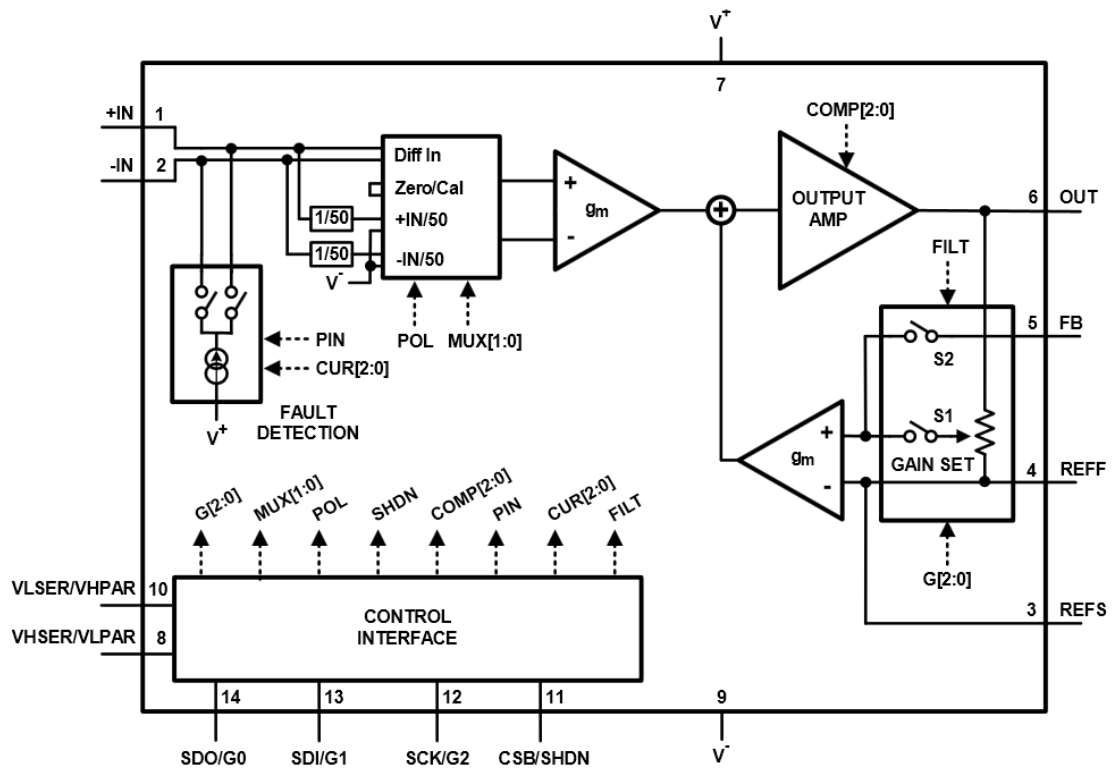
## Příloha A: Přístrojový zesilovač INA331[7]



## Příloha B: Vnitřní zapojení AD8231-EP [8]



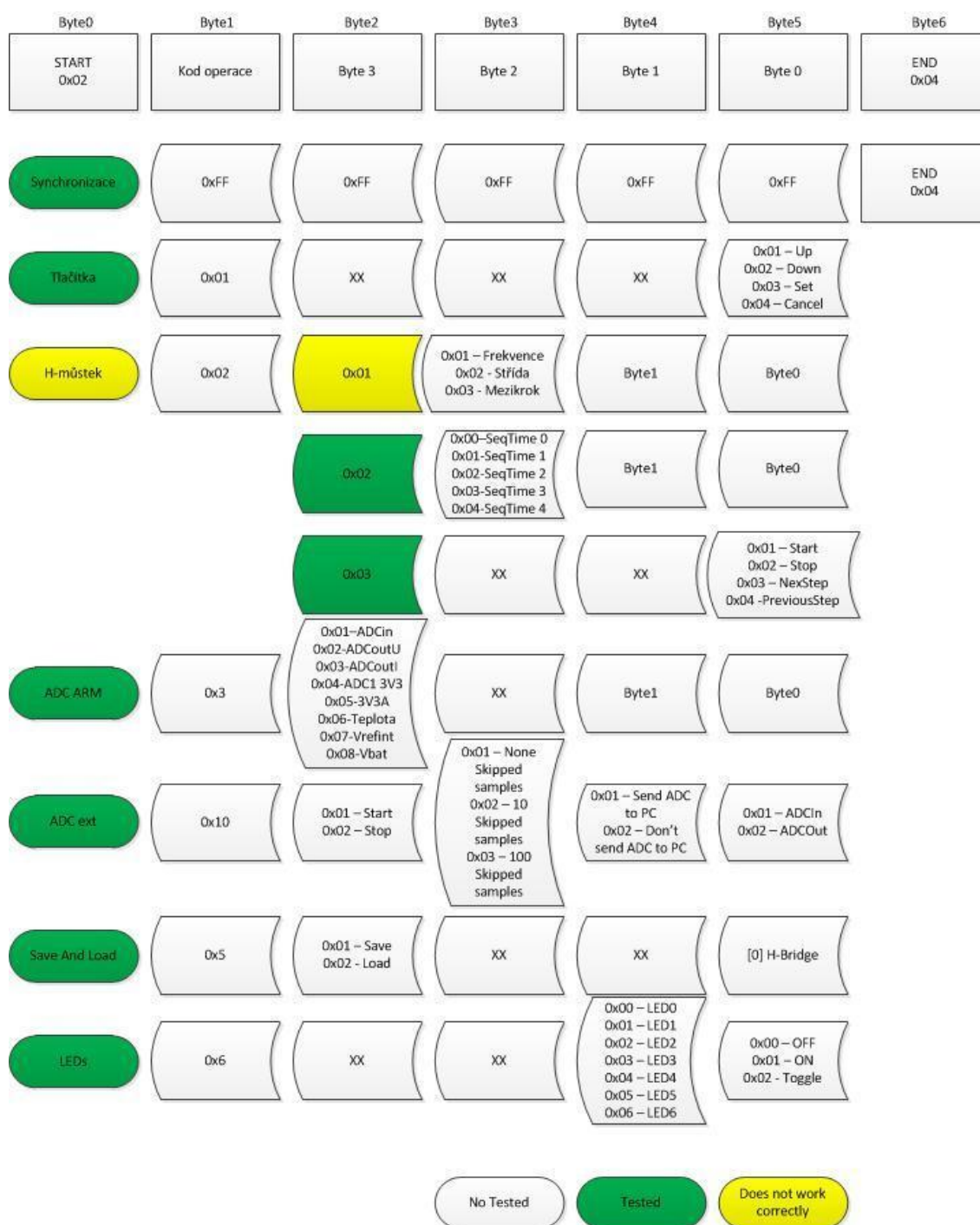
# Příloha C: Blokový diagram LMP8358 [9]

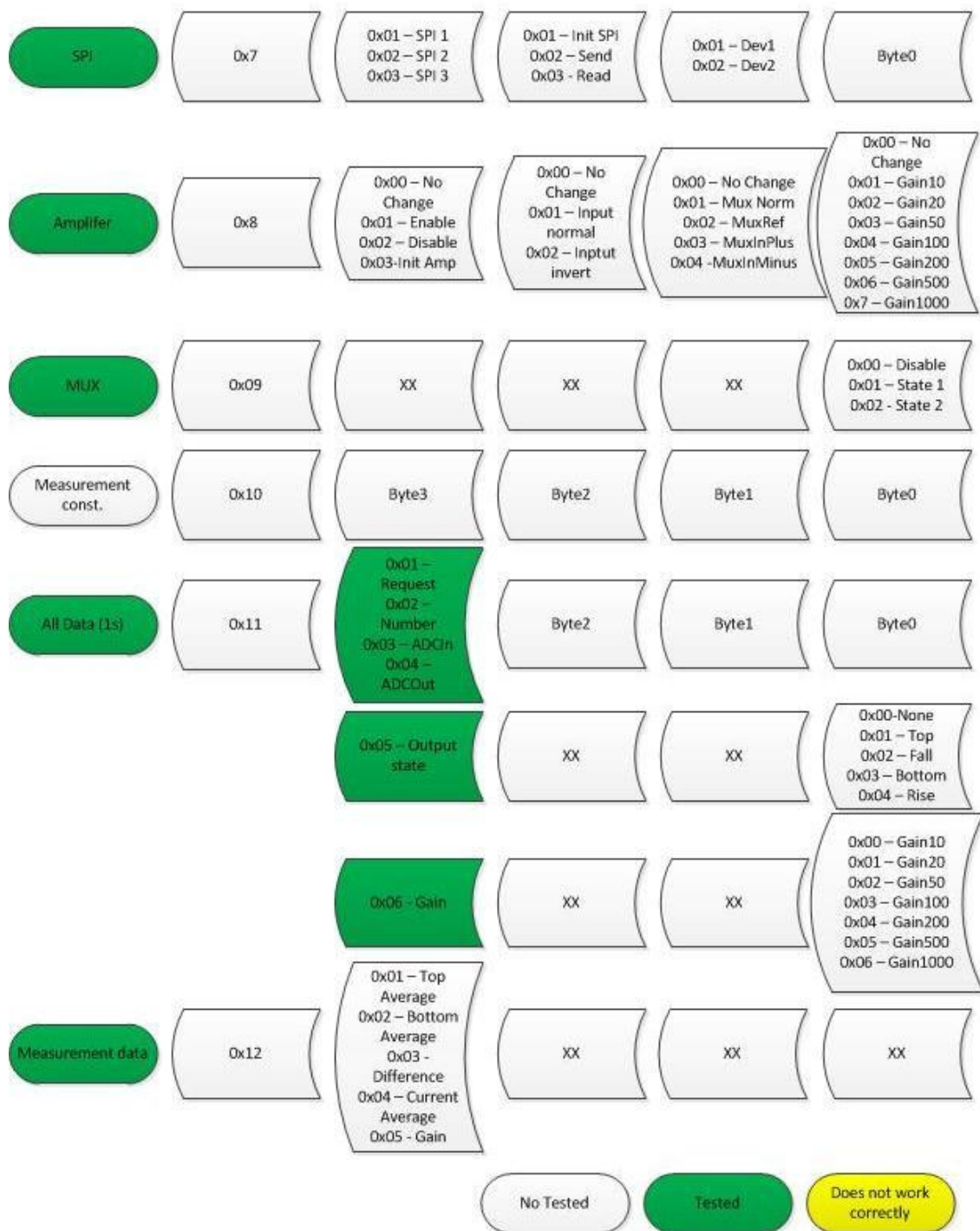


Příloha D: Nastavení vstupů LMP8358 [9]

MUX1	MUX0	Diff Input for POL = 0	Diff Input for POL = 1
0	0	<p><math>V_{OUT} = \text{Gain}((+IN) - (-IN))</math></p>	<p><math>V_{OUT} = \text{Gain}((-IN) - (+IN))</math></p>
0	1	<p><math>V_{OUT} = V_{REF}</math></p>	<p><math>V_{OUT} = V_{REF}</math></p>
1	0	<p><math>V_{OUT} = \text{Gain}((+IN)/50)</math></p>	<p><math>V_{OUT} = -\text{Gain}((+IN)/50)</math></p>
1	1	<p><math>V_{OUT} = \text{Gain}((-IN)/50)</math></p>	<p><math>V_{OUT} = -\text{Gain}((-IN)/50)</math></p>

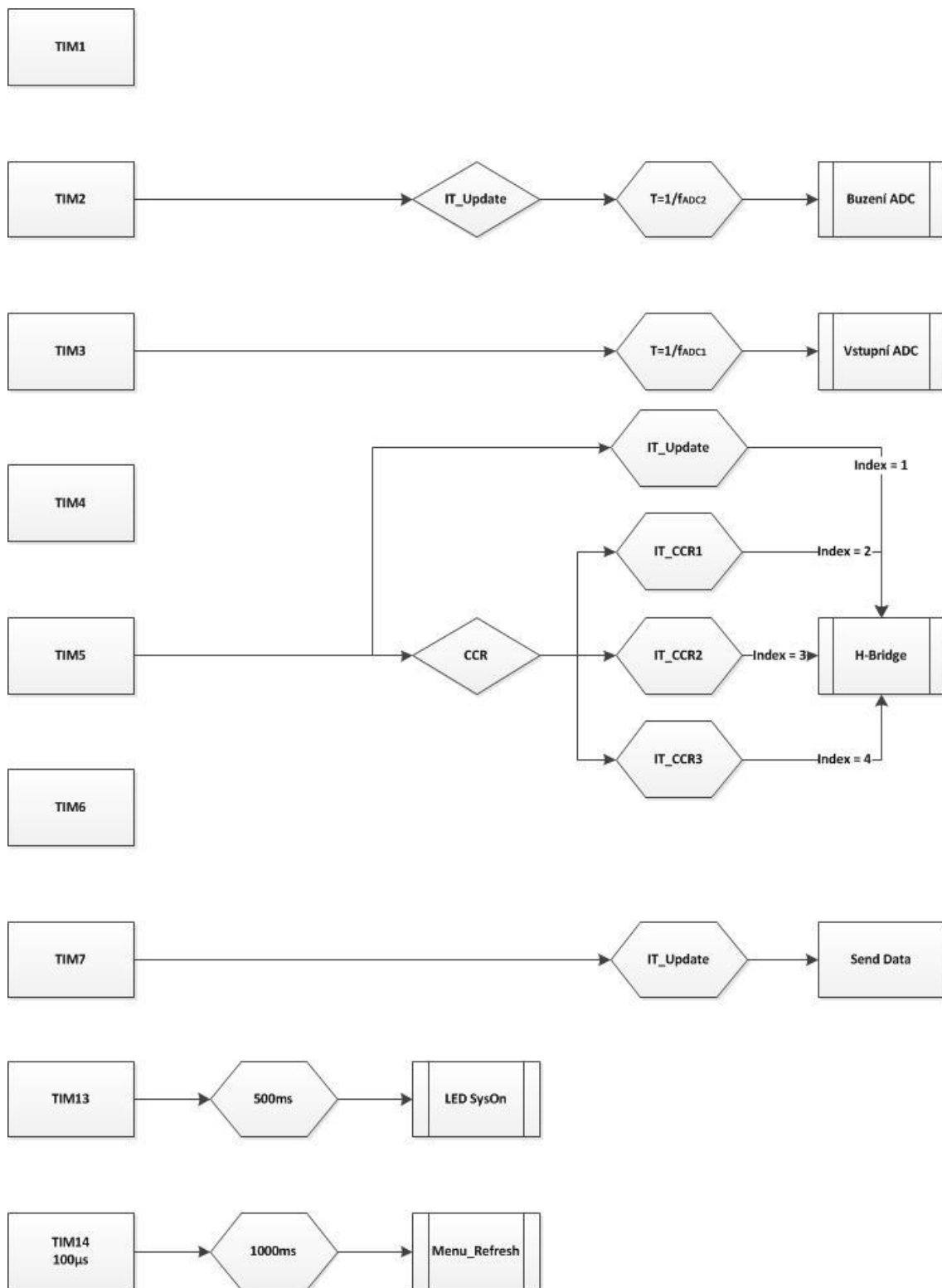
## Příloha E: Komunikační rámec pro USB







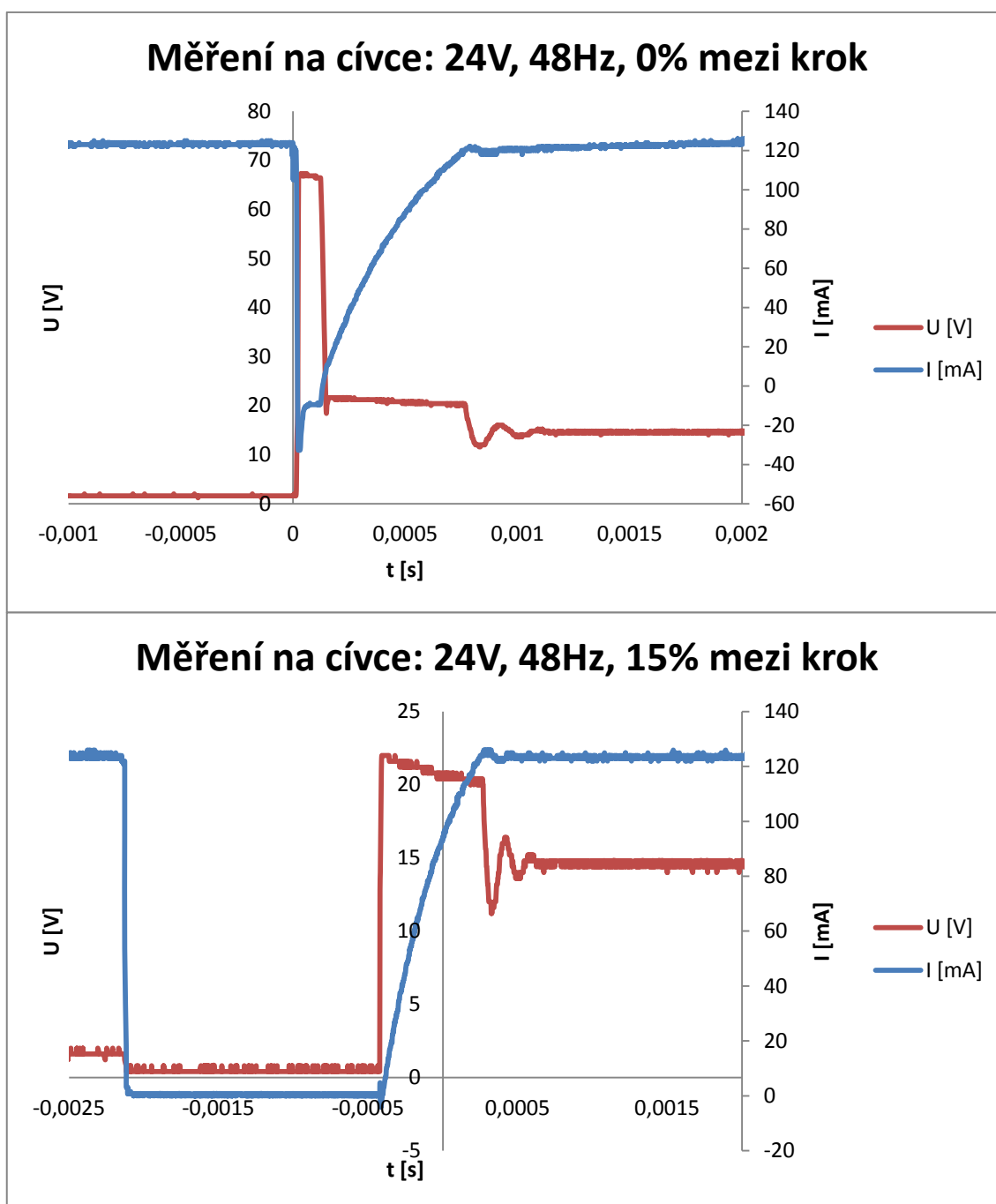
## Příloha F: Využití časovačů v mikroprocesoru



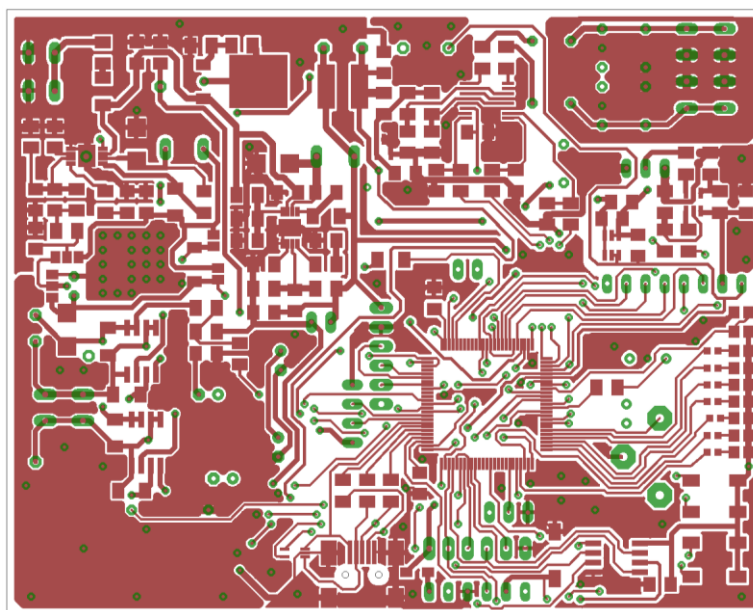
## Příloha G: Signalizace LED

LED 1	Systém v provozu	Blikání 500ms
LED 2	Čtení ADC Vstup	Svítil pouze během čtení
LED 3	Čtení ADC Buzení	Svítil pouze během čtení
LED 4	Hodnota výstupu	Přepne se při změně výstupu
LED 5	Budicí obvod je pod napětím	Svítil pokud je zapnut napěťový dělič

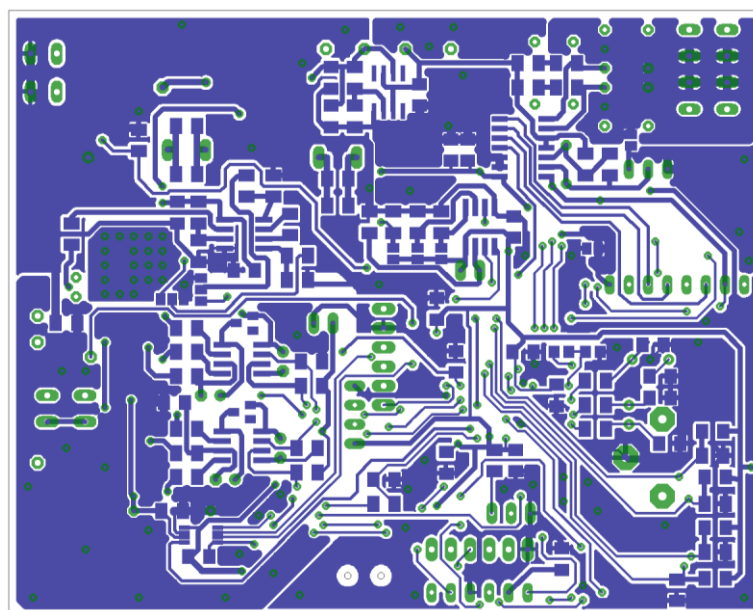
**Příloha H: Porovnání buzení bez mezikroku a s mezikrokem (48Hz)**



**Příloha I: Hlavní DPS Top a Bottom (10 cm x 8 xm)**

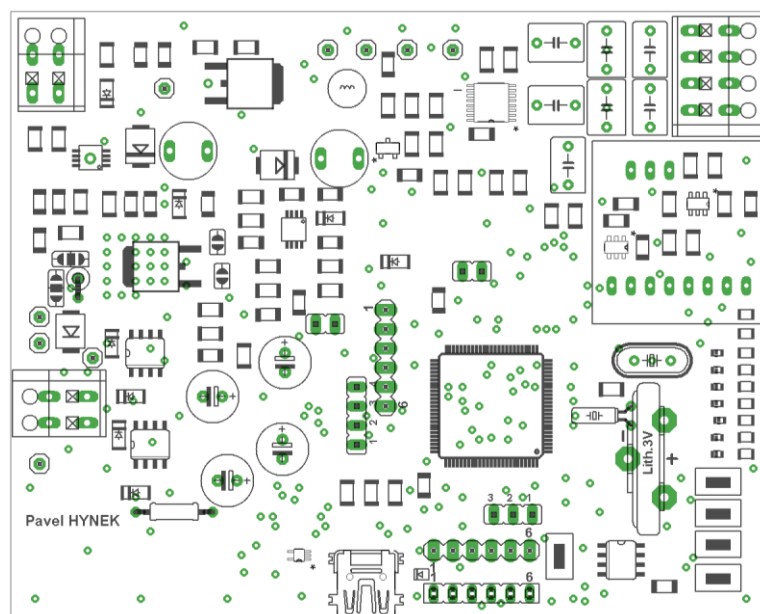


*Návrh vrchní vrstvy DPS*

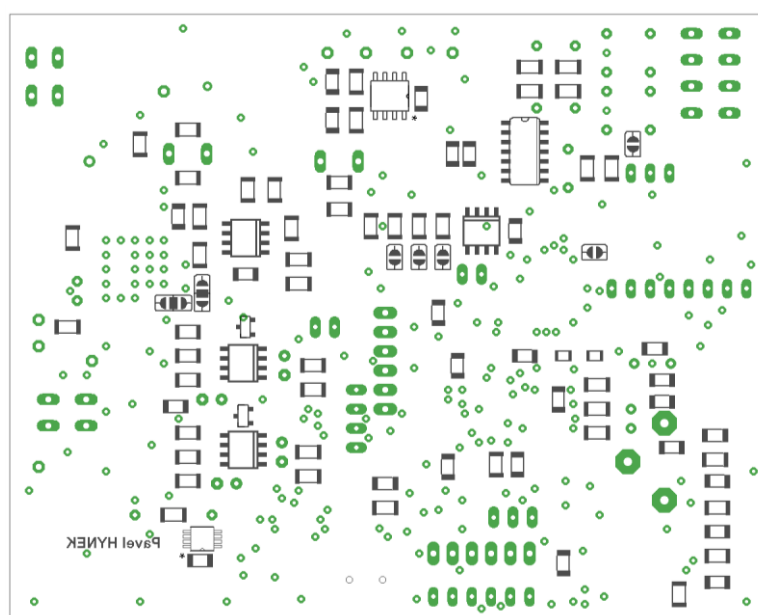


*Návrh spodní vrstvy DPS*

## Příloha J: Rozložení součástek na hlavní DPS (Top a Bottom)

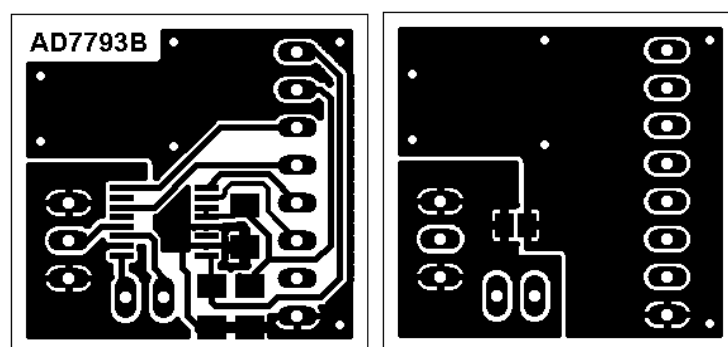


*Návrh vrchního rozložení součástek*

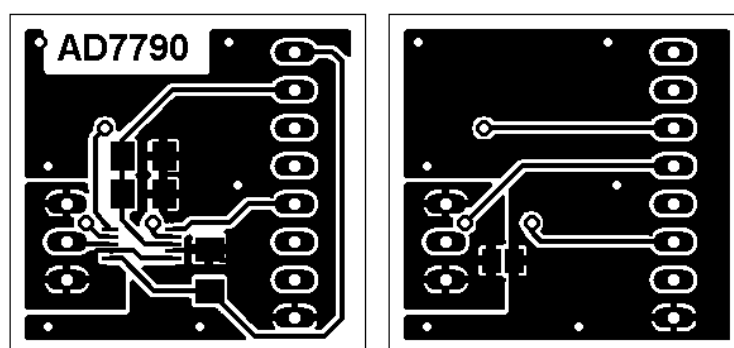


*Návrh spodního rozložení součástek*

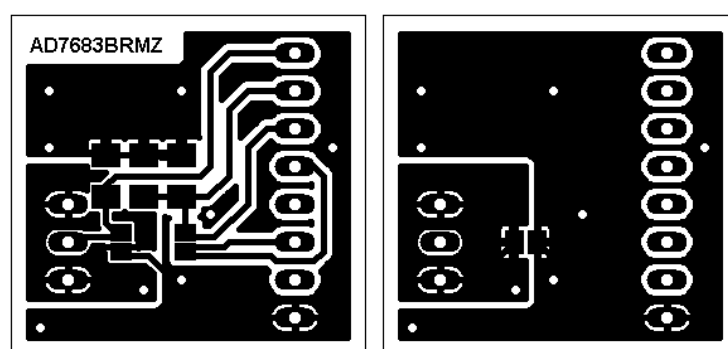
**Příloha K: DPS AD7763B 24 mm x 23 mm (poměr 2:1)**



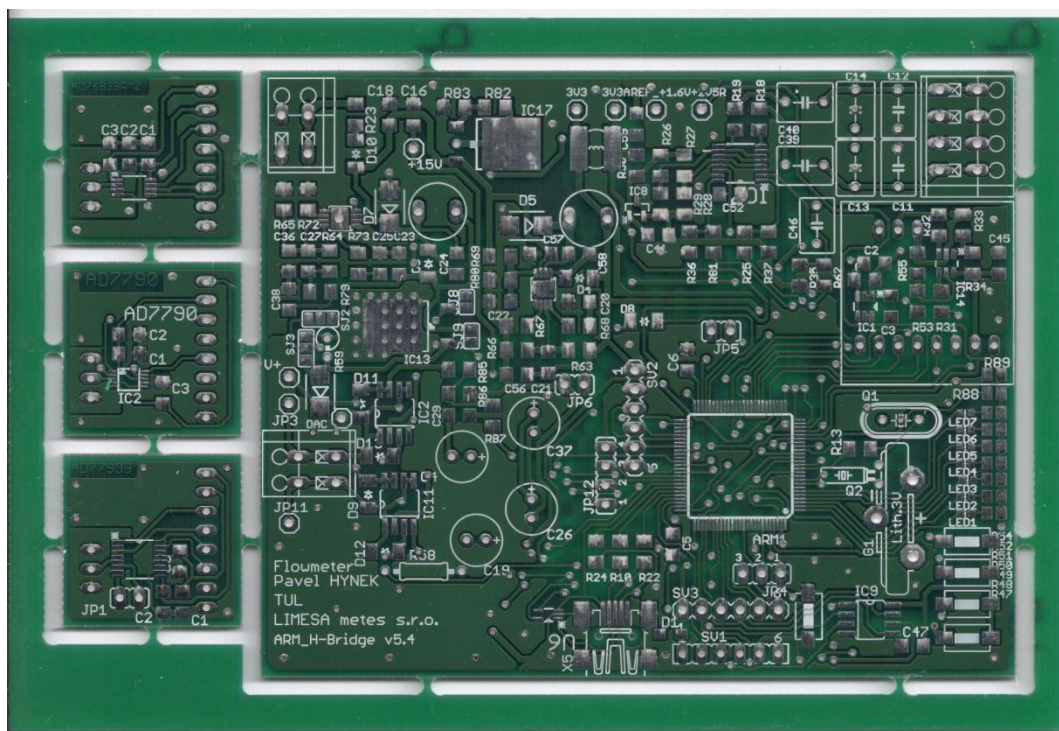
**Příloha L: DPS AD7790 24 mm x 23 mm (poměr 2:1)**



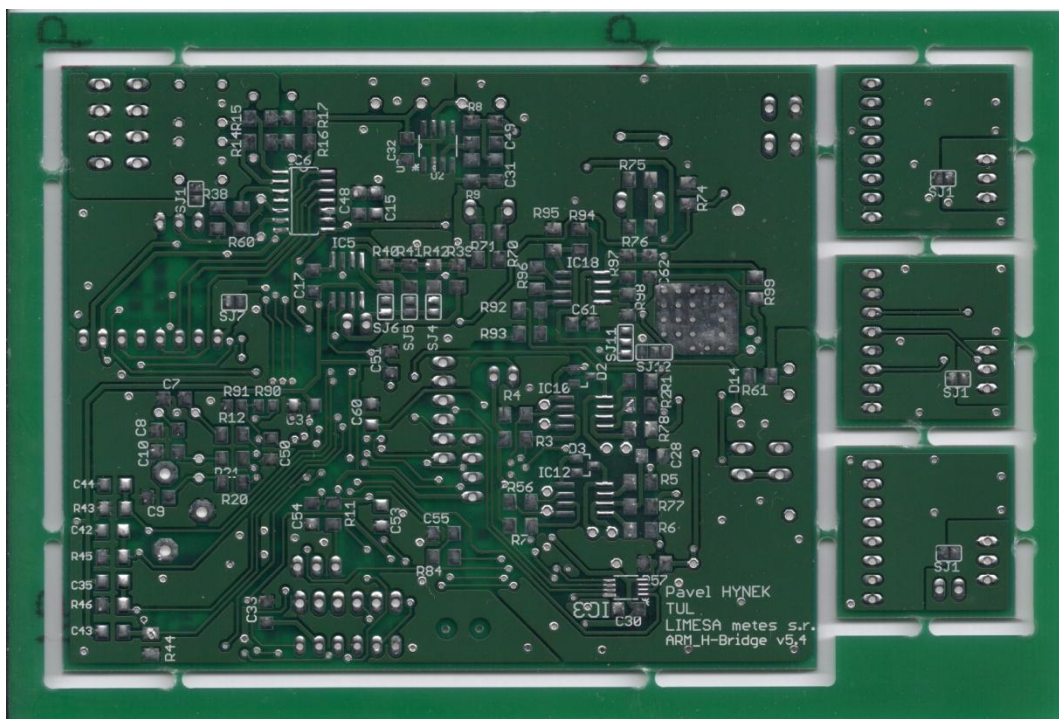
**Příloha M: DPS AD7683 24 mm x 23 mm (poměr 2:1)**



## Příloha N: Vyrobená DPS



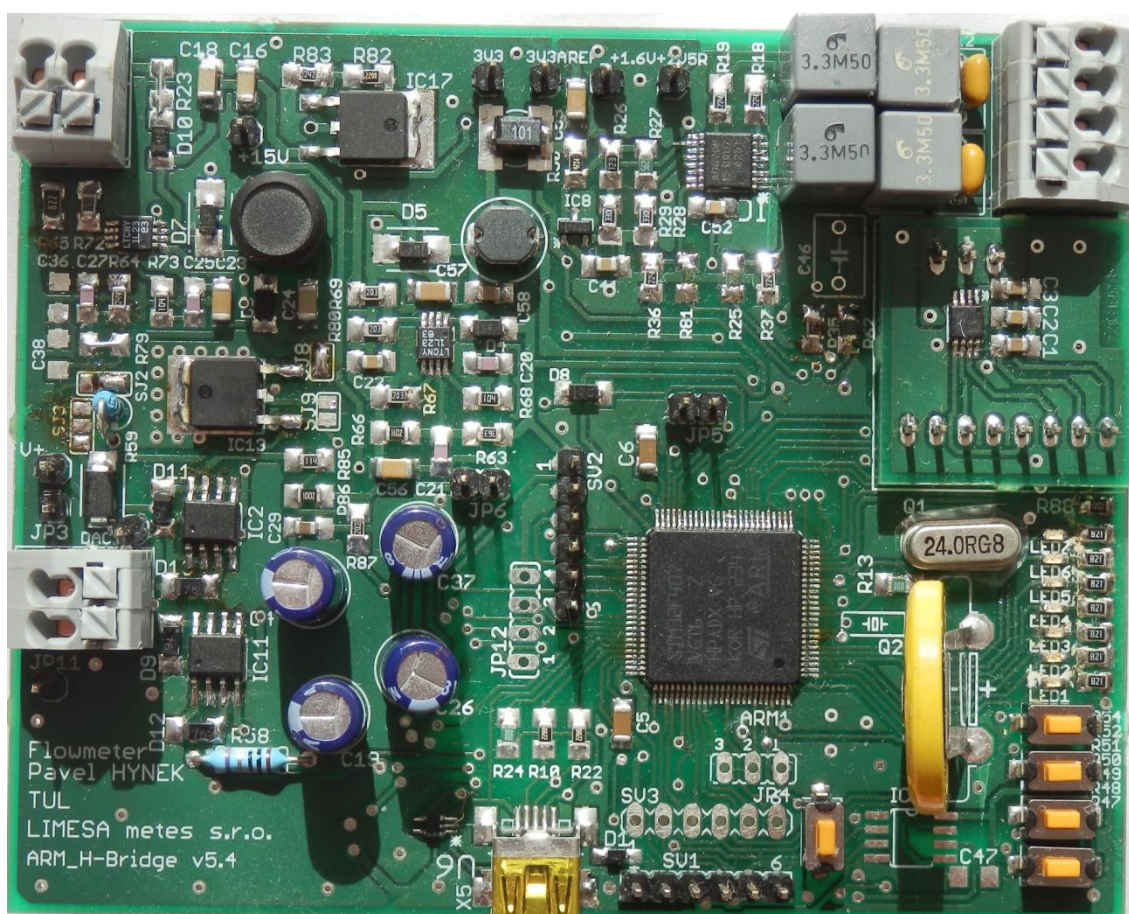
Vrchní strana DPS



Spodní strana DPS

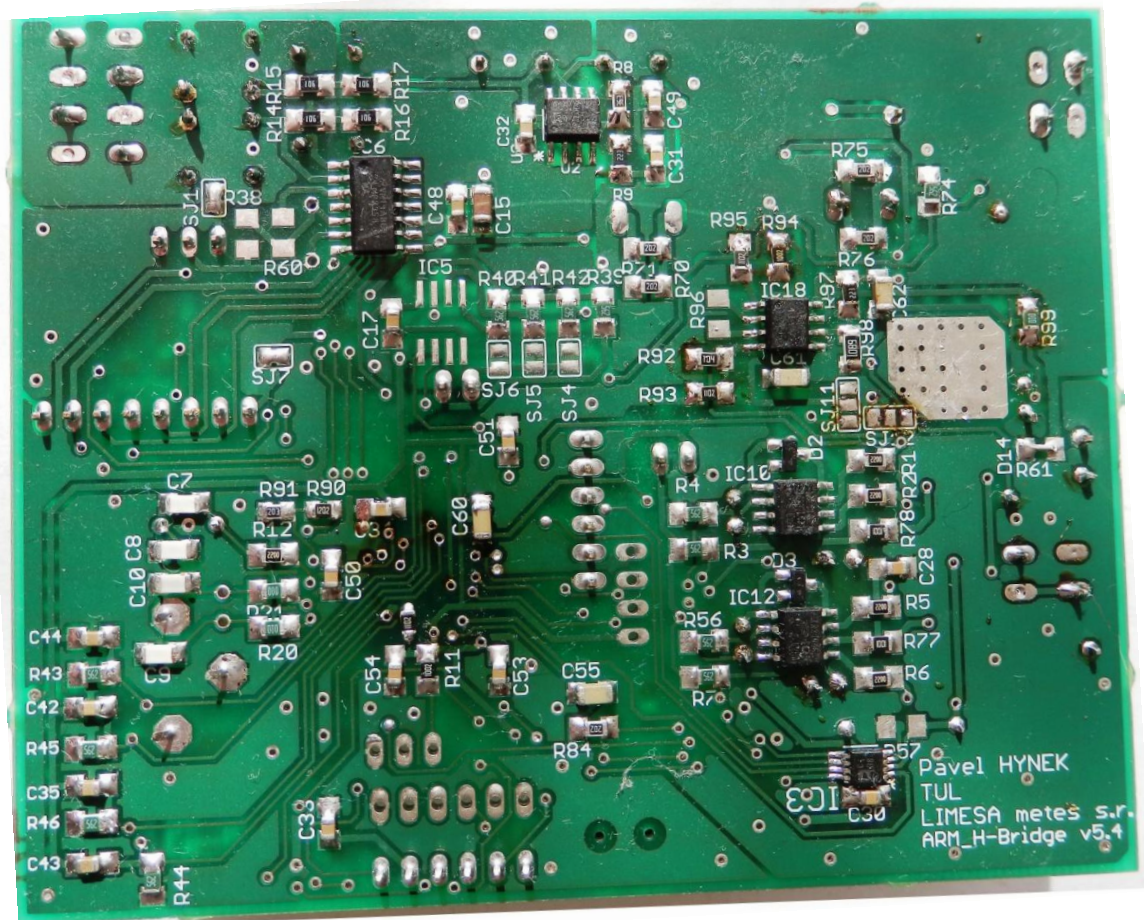


**Příloha O: Osazená hlavní deska + deska převodníku AD7683**



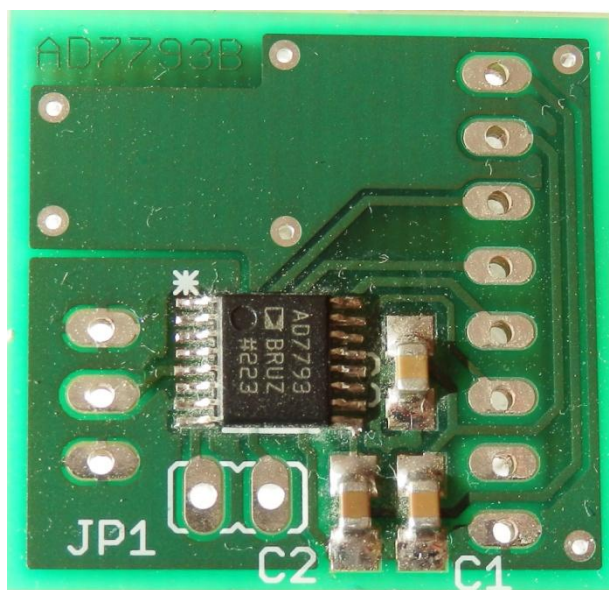
*Osazená vrchní strana testeru*



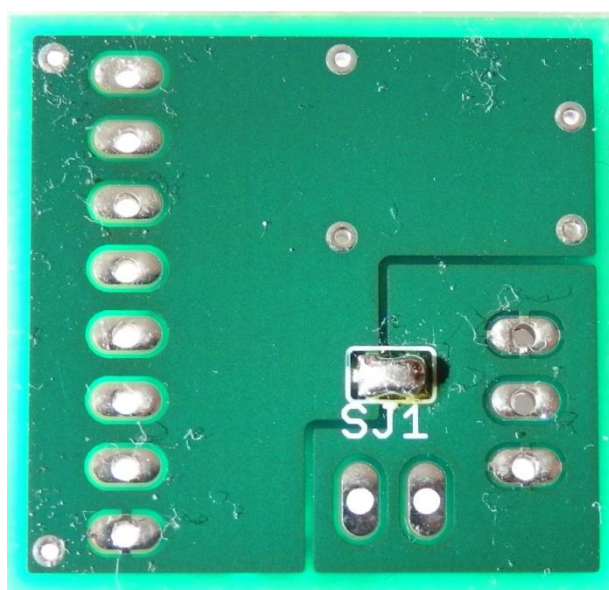


*Osazená spodní deska testeru*

**Příloha P: Samostatná deska převodníku AD7793B**



*Osazená vrchní strana DPS*



*Spodní strana DPS*

## **Příloha Q: Obsah přiloženého DVD**

- Tato práce v elektronické podobě
  - Název souboru: Diplomová práce
  - Formát: PDF
- Návrh hlavní desky
  - Název souborů: FlowMeter DPS
  - Formáty: BRD, SCH
  - Složka: Eagle\Hlavní deska\
- Návrh DPS převodníku AD7683
  - Název souborů: ADC\_AD7683BRMZ
  - Formáty: BRD, SCH
  - Složka: Eagle\ADC\_AD7683\
- Návrh DPS převodníku AD7790
  - Název souborů: ADC\_AD7790
  - Formáty: BRD, SCH
  - Složka: Eagle\ADC\_AD7790\
- Návrh DPS převodníku ADC\_AD7793B
  - Název souborů: ADC\_AD7793B
  - Formáty: BRD, SCH
  - Složka: Eagle\ADC\_AD7793\
- Testovací program pro hlavní desku
  - Název: FlowMeterARM
  - Programovací jazyk: C
  - Složka: Program-ARM\
- Ovládací počítačový program
  - Název: FlowMeter
  - Programovací jazyk: C#
  - Složka: Program-PC\

- Diagramy a rozložení
  - Název: Diagramy
  - Formát: VSD
  - Složka: Diagramy\

